

Prof. Dr. v. Lommel

# LEHRBUCH

DER

# EXPERIMENTALPHYSIK

VON


DR. E. VON LOMMEL

WEIL. O. PROFESSOR DER PHYSIK AN DER UNIVERSITÄT MÜNCHEN


ACHTE UND NEUNTE NEUBEARBEITETE AUFLAGE

HERAUSGEGEBEN VON

PROF. DR. WALTER KÖNIG

MIT EINEM PORTRÄT,

429 FIGUREN IM TEXT UND EINER SPEKTRALTAFEL





LEIPZIG

VERLAG VON JOHANN AMBROSIUS BARTH

1902

1. Auflage: Februar 1893.
2. Auflage: November 1894.
3. Auflage: April 1896.
4. Auflage: November 1897.
5. Auflage: Februar 1899.
6. Auflage: Februar 1900.
7. Auflage: Dezember 1900.
8. u. 9. Auflage: Mai 1902.



Druck von Metzger & Wittig in Leipzig.

## Vorwort zur ersten Auflage.

Das vorliegende „Lehrbuch der Experimentalphysik“ ist (wie das nunmehr vergriffene „Lexikon der Physik“) aus den Vorträgen des Verfassers hervorgegangen. Es stellt sich die Aufgabe, die Grundlehren der Physik dem heutigen Standpunkte unserer Kenntnisse gemäfs ohne ausgedehnte mathematische Entwickelungen allgemein verständlich darzulegen. Unter Anknüpfung an die alltägliche Erfahrung und an leicht auszuführende Versuche sind überall die Thatsachen als unveränderliche Grundlage unseres Wissens in den Vordergrund gestellt. Der gröfser gedruckte Haupttext bildet für sich einen zusammenhängenden Lehrgang, dessen Verständnis nur die elementarsten mathematischen Kenntnisse erfordert und daher auch dem ersten Anfänger zugänglich ist. Der Stoff ist derart angeordnet, dafs niemals später Folgendes vorausgesetzt, sondern nur auf früher Besprochenes zurückverwiesen wird. Die Anordnung entspricht demgemäfs im allgemeinen dem historischen Entwickelungsgang der Wissenschaft; denn unter Vermeidung der Ab- und Umwege, welche die Wissenschaft bei ihrem Weiterschreiten manchmal gegangen ist, bleibt dieser geschichtliche Weg nach unserer Überzeugung auch für die Entwickelung jedes Einzelnen der förderlichste; historische Daten haben deshalb durchaus gebührende Berücksichtigung gefunden.

Um jedoch nicht nur dem ersten Anfangsstudium zu genügen, sondern auch den Bedürfnissen von Mittel- und Hochschulen Rechnung zu tragen, sind kleiner gedruckte Abschnitte eingestreut, welche in engem Anschlufs an den Haupttext die wichtigsten mathematischen Entwickelungen in möglichst knapper elementarer Darstellung enthalten.

Durch ein ausführliches Inhaltsverzeichnis, Namen und Sachregister ist dafür gesorgt, dafs das Werk auch als bequemes Nachschlagebuch dienen kann.

Möge der Wunsch des Verfassers, dafs das Buch beim Unterricht, zur Wiederholung und zur Selbstbelehrung weitesten Kreisen Nutzen bringe, in Erfüllung gehen.

München, im Februar 1893.

**Der Verfasser.**

## Aus dem Vorwort zur sechsten Auflage.

Am 19. Juni 1899 ist Professor von Lommel gestorben. Er hat der deutschen Physik aufser einer Fülle wissenschaftlicher Forschungen einige zusammenfassende Darstellungen geschenkt, von denen das vorliegende Werk offenbar ein ganz besonders glücklicher Wurf gewesen ist. Denn es war seinem Verfasser vergönnt, in 6 Jahren nicht weniger als 5 Auflagen dieses Buches herauszugeben.

Die Weiterführung eines mit solchem Erfolge eingeführten Werkes stellt dem Herausgeber, der an die Stelle des Verfassers tritt, eine doppelte Aufgabe. Es kann sich einerseits nicht darum handeln, das Werk in seinem Inhalt möglichst unverändert zu erhalten. Jede neue Auflage verlangt, wenn sie mit der Wissenschaft Schritt halten will, nicht bloſs Zusätze, sondern auch Änderungen, und in gröſseren Pausen werden bei dem schnellen Fortschritt der Wissenschaft auch vollständige Umarbeitungen ganzer Abschnitte nicht zu umgehen sein. Andererseits aber soll neben diesen Änderungen und trotz derselben die Eigenart des Buches, die ihm seinen ausgedehnten Leserkreis erworben hat, nach Möglichkeit erhalten bleiben. Sie liegt für das Lommelsche Buch ganz überwiegend in der Art der Darstellung, die breit und behaglich, wo es geht, an die alltägliche Erfahrung anknüpfend, die physikalischen Lehren den Lesern so mundgerecht wie irgend möglich zu machen sucht.

Im Sinne dieser doppelten Aufgabe habe ich, dem Wunsche des Herrn Verlegers entsprechend, die weitere Bearbeitung des Lommelschen Lehrbuches übernommen.

Möchte es mir gelingen, das Buch als das zu erhalten, was es ist, als ein würdiges und charakteristisches Denkmal seines Verfassers.

Frankfurt a. M., Neujahr 1900.

**Der Herausgeber.**

## Vorwort zur achten und neunten Auflage.

Nachdem die siebente Auflage, unter Berücksichtigung der raschen Folge der letzten Auflagen, als unveränderter Abdruck der sechsten, erschienen war, habe ich bei der nunmehr herauskommenden neuen Doppelauflage dem Wunsch nach einer Anpassung des Werkes an den neuesten Standpunkt der Physik wieder durch eine Reihe weiterer Zusätze und Umänderungen entsprechen zu müssen geglaubt. So ist, abgesehen von kleineren Änderungen, der Abschnitt über Elektricität und besonders derjenige über elektrische Ströme an vielen Stellen umgearbeitet und durch neue Artikel (über Röntgen- und Becquerelstrahlen, über das sprechende Licht, über elektrische Schwingungen) vervollständigt worden. In dem Abschnitte „Licht“ ist ein Artikel über die neuen Strahlungsgesetze eingefügt und der Artikel „Farbenempfindung“ neu redigirt worden; dagegen sind die Artikel über Irradiation und über Pseudoskopische Erscheinungen als auſserhalb der Experimentalphysik liegend, fortgelassen worden. Eine Reihe neuer Abbildungen wurde dem Buche eingefügt; auch sind manche der älteren Abbildungen erneuert worden.

Greifswald, April 1902.

**Der Herausgeber.**

# Inhalt.

Seite

**Einleitung.**

1. Physik . . . . . . . . . 1
2. Messung. Mafseinheiten . 2

**I. Bewegung** (Mechanik).

3. Bewegung und Ruhe . . . 5
4. Gleichförmige Bewegung . 5
5. Bewegung und Kraft. Schwerkraft. Gewicht. Gleichgewicht zweier Kräfte . . . 6
6. Mafs der Kraft. Ihre Richtung und ihre Gröfse. . . 7
7. Fallmaschine. Gleichförmig beschleunigte Bewegung . . 8
8. Gesetze der gleichförmig beschleunigten Bewegung . . 10
9. Geschwindigkeit u. Beschleunigung bei beliebig ungleichförmiger Bewegung . . . 11
10. Beschleunigung des freien Falles . . . . . . . . . 12
11. Masse . . . . . . . . . 12
12. Einheiten der Masse und der Kraft . . . . . . . . . 14
13. Allgemeine Gesetze der Bewegung . . . . . . . . 15
14. Vertikaler Wurf . . . . 17
15. Horizontaler und schiefer Wurf . . . . . . . . . 19
16. Bewegungsgröfse. Stofskraft 20
17. Arbeit . . . . . . . . . 21
18. Wucht . . . . . . . . . 21
19. Energie . . . . . . . . . 23

Seite

20. Zusammensetzung der Bewegungen. Parallelogramm der Kräfte . . . . . . . 25
21. Bewegung und Gleichgewicht auf schiefer Ebene . . . . 27
22. Schraube . . . . . . . . 29
23. Zusammensetzung zweier Kräfte in einer Ebene an verschiedenen Punkten eines Körpers . . . . . . . . 31
24. Keil . . . . . . . . . . 31
25. Parallele Kräfte . . . . . 32
26. Kräftepaar . . . . . . . . 34
27. Zusammensetzung beliebiger Kräfte, die an verschiedenen Punkten eines starren Körpers angreifen . . . . . . 36
28. Mittelpunkt der parallelen Kräfte. Schwerpunkt . . 36
29. Hebel . . . . . . . . . 38
30. Rolle. Flaschenzüge . . . 41
31. Maschinen . . . . . . . . 42
32. Formen des Gleichgewichts. Standfestigkeit . . . . . . 44
33. Wage . . . . . . . . . 46
34. Centralbewegung . . . . 48
35. Centripetalkraft . . . . . 50
36. Centrifugalkraft . . . . . 52
37. Kreiselbewegung . . . . 55
38. Winkelgeschwindigkeit . . 57
39. Trägheitsmoment . . . . 58
40. Pendel . . . . . . . . . 58
41. Sekundenpendel. Bestimmung von $g$ . . . . . . . . . 63
42. Foucaultsches Pendel . . . 64

Seite
43. Physisches Pendel . . . . 65
44. Keplers Gesetze der Planetenbewegung . . . . . . . 66
45. Allgemeine Gravitation . . 67
46. Ebbe und Flut . . . . 70

**II. Feste Körper.**

47. Allgemeine Eigenschaften der Körper . . . . . . 72
48. Atome. Moleküle . . . 73
49. Elemente . . . . . . . 75
50. Molekularkräfte . . . . 76
51. Kohäsion . . . . . . . . 77
52. Elasticität . . . . . . 79
53. Elastische Schwingungen . 82
54. Krystallisation . . . . . 83
55. Stofs . . . . . . . . . 85
56. Reibung (Friktion) . . . 88

**III. Flüssigkeiten.** (Hydrostatik).

57. Flüssige Körper . . . . 91
58. Fortpflanzung des Druckes 91
59. Wirkung der Schwerkraft 93
60. Bodendruck . . . . . . 95
61. Seitendruck . . . . . . 96
62. Auftrieb . . . . . . . 97
63. Archimedisches Gesetz . . 97
64. Bestimmung des Volumens. Spezifisches Gewicht (Dichte) 99
65. Schwimmen . . . . . . . 101
66. Aräometer . . . . . . . 103
67. Ausfliefsen der Flüssigkeiten . . . . . . . . 104
68. Ausfliefsen durch Röhren . 106
69. Reaktion ausströmender Flüssigkeiten . . . . . 106
70. Wassermotoren . . . . 107
71. Zusammendrückbarkeit der Flüssigkeiten . . . . . 108
72. Kohäsion der Flüssigkeiten 109
73. Flüssigkeitshäutchen. Blasen . . . . . . . . . 111
74. Adhäsion. Randwinkel . 112
75. Kapillarität . . . . . . 112
76. Auflösung . . . . . . 114
77. Diffusion . . . . . . . 115
78. Osmose . . . . . . . . 115

**IV. Gase** (Aërostatik).

79. Expansivkraft . . . . . 118
80. Gewicht der Luft. Luftdruck . . . . . . . . 118
81. Barometer . . . . . . 119
82. Mariottesches (Boylesches) Gesetz . . . . . . . . 123
83. Barometerformel . . . . 125
84. Manometer . . . . . . 126
85. Luftpumpe . . . . . . 126
86. Kompressionspumpe . . 131
87. Fortpflanzung des Druckes. Auftrieb . . . . . . . 131
88. Spezifisches Gewicht der Gase . . . . . . . . 133
89. Einige Anwendungen des Luftdruckes . . . . . 135
90. Heronsball . . . . . . 139
91. Stofsheber . . . . . . 139
92. Ausströmen der Gase . . 140
93. Die pneumatische Wanne 141
94. Gasometer . . . . . . 142
95. Gasmesser . . . . . . 143
96. Diffusion der Gase . . . 143
97. Absorption der Gase . . 144

**V. Wärme.**

98. Wärme . . . . . . . 148
99. Thermometer . . . . . 149
100. Die Ausdehnung der festen Körper . . . . . . . 152
101. Ausdehnung flüssiger Körper . . . . . . . . 156
102. Anomalie des Wassers . 158
103. Ausdehnung der luftförmigen Körper . . . . . 160
104. Luftthermometer . . . . 161
105. Mariotte-Gay-Lussacsches Gesetz. Absolute Temperatur . . . . . . . . 162
106. Abweichungen vom Mariotte-Gay-Lussacschen Gesetz . . . . . . . . 164
107. Reduktion der Gasvolumina 164
108. Schmelzen. Schmelzpunkt. Schmelzwärme. Wärmeeinheit . . . . . . . 165
109. Gefrieren von Lösungen 168
110. Kältemischungen . . . 169
111. Krystallisationswärme. Verbindungswärme . . . . 170
112. Dampfbildung . . . . 171
113. Spannkraft gesättigter Dämpfe . . . . . . . 173
114. Sieden oder Kochen . . 176
115. Leidenfrostsche Erscheinung . . . . . . . . 178
116. Verdampfung im lufterfüllten Raum . . . . . . 179
117. Verdampfungswärme . . 179
118. Destillation . . . . . 180
119. Verdunstungskälte . . . 181
120. Spezifisches Gewicht eines Dampfes (Dampfdichte) . 183

| | | Seite |
|---|---|---|
| 121. | Feuchtigkeit der Luft | 185 |
| 122. | Verflüssigung der Gase | 188 |
| 123. | Graphische Darstellung des Verhaltens der Gase und Dämpfe | 194 |
| 124. | Spezifische Wärme | 195 |
| 125. | Wärmeleitung | 201 |
| 126. | Wärmestrahlung | 205 |
| 127. | Mechanische Wärmetheorie | 206 |
| 128. | Aggregatzustände | 209 |
| 129. | Kinetische Theorie d. Gase | 211 |
| 130. | Zweiter Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie | 214 |
| 131. | Dampfmaschine | 215 |


## VI. Magnetismus.

| | | |
|---|---|---|
| 132. | Magnetismus | 218 |
| 133. | Molekularmagnete | 218 |
| 134. | Magnetische Influenz. Koërcitivkraft. Sättigung | 219 |
| 135. | Formen d. Magnete. Anker. Tragkraft | 220 |
| 136. | Magnetisirungsmethoden | 221 |
| 137. | Erdmagnetismus | 221 |
| 138. | Astasie | 222 |
| 139. | Magnetischer Meridian. Deklination | 222 |
| 140. | Inklination | 224 |
| 141. | Intensität des Erdmagnetismus | 225 |
| 142. | Variationen | 227 |
| 143. | Magnetometer | 227 |
| 144. | Coulombs Gesetz | 228 |
| 145. | Magnetfeld. Kraftlinien. Niveauflächen | 228 |
| 146. | Magnetisches Moment | 231 |
| 147. | Wirkung zweier Magnete aufeinander | 231 |
| 148. | Bestimmung der Horizontalintensität und des magnetischen Moments | 232 |
| 149. | Einfluſs (Influenz, Induktion) eines Magnetfeldes | 233 |


## VII. Elektricität.

| | | |
|---|---|---|
| 150. | Elektrisirung | 234 |
| 151. | Leiter und Nichtleiter | 234 |
| 152. | Isolirung | 235 |
| 153. | Zwei Arten v. elektrischen Zuständen | 235 |
| 154. | Übertragung d. Elektricität | 236 |
| 155. | Elektricitätsmenge | 236 |
| 156. | Positive und negative Elektricität | 236 |
| 157. | Gleichzeitige Erzeugung beider Elektricitäten | 237 |
| 158. | Sitz d. elektrischen Ladung | 238 |
| 159. | Dichte der Elektricität | 238 |
| 160. | Elektrostatischer Druck | 239 |
| 161. | Wirkung der Spitzen | 240 |
| 162. | Coulombs Gesetz | 241 |
| 163. | Wirkung einer elektrisirten Kugel | 243 |
| 164. | Elektrisches Feld. Elektrische Spannung (Potential). Niveauflächen. Kraftlinien | 244 |
| 165. | Potentialgefälle | 246 |
| 166. | Gleichgewicht in Leitern | 246 |
| 167. | Dielectrica | 246 |
| 168. | Elektrische Kapacität | 246 |
| 169. | Werte des Potentials und der Kapacität | 247 |
| 170. | Energie der elektrischen Ladung | 249 |
| 171. | Elektrische Influenz | 249 |
| 172. | Elektrisirung durch Influenz | 250 |
| 173. | Saugwirkung der Spitzen | 251 |
| 174. | Schirmwirkung | 251 |
| 175. | Erklärung elektrischer Erscheinungen durch Influenz | 252 |
| 176. | Elektroskope | 252 |
| 177. | Elektrophor | 254 |
| 178. | Die Elektrisirmaschine | 255 |
| 179. | Elektrischer Funke. Schlagweite | 257 |
| 180. | Ansammlungsapparate (Kondensatoren) | 257 |
| 181. | Leidener Flasche. Franklinsche Tafel | 259 |
| 182. | Maſsflasche | 262 |
| 183. | Kaskadenbatterie | 262 |
| 184. | Dielektricitätskonstante | 263 |
| 185. | Dielektrische Polarisation | 263 |
| 186. | Sitz der Ladung in einer Leidener Flasche. Rückstand | 264 |
| 187. | Die Influenzmaschine | 265 |
| 188. | Messung der elektrischen Kraft, der Elektricitätsmenge, des Potentials und der Kapacität. Elektrometer | 269 |
| 189. | Entladungserscheinungen | 272 |
| 190. | Dauer des elektrischen Funkens | 274 |
| 191. | Büschel- und Glimmentladung. Lichtenbergische Figuren | 274 |
| 192. | Elektrischer Geruch | 275 |
| 193. | Luftelektricität | 275 |
| 194. | Pyroelektricität | 278 |
| 195. | Piezoelektricität | 278 |

Seite

VIII. Elektrische Ströme.

196. Entladungsströme. Konstante Ströme . . . . . 279
197. Galvanis Entdeckung . . 280
198. Voltascher Becher. Galvanisches Element . . . 280
199. Sitz der elektromotorischen Kraft . . . . . . . . 281
200. Voltasches Spannungsgesetz 282
201. Voltasche Säule . . . . 283
202. Die trockene oder Zambonische Säule . . . . 284
203. Bechersäule. Galvanische Batterie . . . . . . . 285
204. Der elektrische (galvanische) Strom . . . . . 286
205. Andere Formen der galvanischen Elemente . . . 287
206. Stromwender (Kommutatoren, Gyrotrope) . . . 290
207. Elektrolyse . . . . . . 291
208. Elektrolytische und metallische Leitung . . . . 294
209. Faradays elektrolytische Gesetze . . . . . . . 294
210. Theorie der Elektrolyse . 295
211. Voltameter . . . . . 297
212. Galvanoplastik . . . . 298
213. Ablenkung der Magnetnadel 298
214. Ampèresche Regel . . . 299
215. Galvanoskop . . . . . 299
216. Galvanometer. Multiplikator 299
217. Spiegelgalvanometer . . 301
218. Tangentenbussole . . . 302
219. Galvanische Polarisation . 303
220. Sekundärelement. Accumulator . . . . . . . . 304
221. Unpolarisirbare Elektroden 305
222. Konstante galvanische Elemente . . . . . . . 306
223. Widerstand. Leitungsfähigkeit . . . . . . . . 308
224. Widerstandseinheit . . . 309
225. Rheostate . . . . . . 309
226. Ohmsches Gesetz . . . 311
227. Anwendungen des Ohmschen Gesetzes . . . . 313
228. Konstanten galvanischer Elemente . . . . . . 315
229. Stromverzweigung . . . 315
230. Wheatstonesche Brücke 317
231. Kompensationsverfahren . 318
232. Kirchhoffsche Sätze . . 318
233. Strömung in körperlichen Leitern . . . . . . . 319
234. Stromwärme. Joulesches Gesetz . . . . . . . 320

Seite

235. Glühlampen . . . . . 322
236. Davys Flammenbogen . . 323
237. Thermoelektricität . . . 324
238. Peltiersche Wirkung . . 326
239. Elektromagnete . . . . 328
240. Solenoide . . . . . . . 330
241. Magnetfeld um einen Strom 331
242. Elektromagnetische Drehung 333
243. Biot-Savartsches Gesetz . 333
244. Stromelemente . . . . 334
245. Berechnung der Wirkung eines Kreisstromes auf einen Magnetpol . . . 334
246. Absolute elektromagnetische Einheit der Stromstärke . . . . . . . 335
247. Para- und Diamagnetismus 336
248. Elektromagnetische Telegraphie . . . . . . . 337
249. Wagnerscher Hammer . 340
250. Elektrische Klingel . . . 340
251. Elektrische Uhren . . . 341
252. Elektromagnetische Motoren 341
253. Elektrische Bogenlampen 342
254. Strom- u. Spannungsmesser für technische Zwecke . 344
255. Wirkung eines Magnetfeldes auf einen Stromleiter . . . . . . . . 344
256. Elektrodynamische Wirkung . . . . . . . . 346
257. Das Elektrodynamometer 348
258. Ampères Theorie des Magnetismus . . . . . 349
259. Induktion . . . . . . . 350
260. Gesetz von Lenz . . . 353
261. Elektromotorische Kraft des Induktionsstromes . 354
262. Absolute elektromagnetische Einheit der elektromotorischen Kraft . . . 355
263. Extraströme. Selbstinduktion . . . . . . . . 355
264. Unterschied zwischen Schliefsungs- und Öffnungsstrom . . . . . . . . 356
265. Messung des galvanischen Widerstandes in Elektrolyten . . . . . . . . 357
266. Physiologische Wirkung der Induktionsströme . . 357
267. Induktionsapparate. Funkeninduktoren . . . . 359
268. Geifslersche (Plückersche) Röhren. Kathodenstrahlen 362
269. Röntgenstrahlen. Becquerelstrahlen . . . . . . 367

Seite

270. Magnetelektrische Maschinen . . . . . . . . 369
271. Dynamoelektr. Maschinen 374
272. Elektromotoren. Elektrische Kraftübertragung . 375
273. Transformatoren . . . . 378
274. Drehstrom-Motoren . . . 378
275. Erdinduktion . . . . . 380
276. Bestimmung der absoluten Einheit des Widerstandes mittels des Erdinduktors 381
277. Induktion in körperlichen Leitern. Foucaultsche Ströme. Rotationsmagnetismus . . . . . . . 382
278. Dämpfung . . . . . . 383
279. Das Telephon . . . . . 383
280. Das Mikrophon . . . . 384
281. Der sprechende Lichtbogen 385
282. Elektrische Schwingungen 385
283. Absolute Maſseinheiten . 389

**IX. Wellen und Schall.**

A. Wellenbewegung.

284. Wellenbewegung . . . 393
285. Interferenz . . . . . . 398
286. Stehende Wellen . . . 399

B. Schall (Akustik).

287. Schall . . . . . . . . 403
288. Vorgang der Fortpflanzung 403
289. Schwächung des Schalles durch Ausbreitung . . . 404
290. Fortpflanzungsgeschwindigkeit . . . . . . . . . 405
291. Zurückwerfung des Schalles 407
292. Verschiedenartige Schallempfindungen. Sirene . . 409
293. Tonleiter . . . . . . . 410
294. Absolute Schwingungszahlen . . . . . . . . 412
295. Wellenlänge . . . . . . 413
296. Pfeifen . . . . . . . . 414
297. Longitudinalschwingungen von Stäben . . . . . 419
298. Kundtsche Röhren . . . 419
299. Saiten . . . . . . . . 420
300. Transversalschwingungen von Stäben . . . . . 421
301. Schwingende Platten . . 422
302. Zungenpfeifen . . . . 423
303. Zusammensetzung rechtwinkliger Schwingungen . 423
304. Vibrographie . . . . . . 425

Seite

305. Interferenz der Schallwellen 426
306. Schwebungen . . . . . 426
307. Kombinationstöne . . . 427
308. Resonanz . . . . . . . 427
309. Klangfarbe . . . . . . 428
310. Vokale . . . . . . . . 431
311. Phonograph. Grammophon 431
312. Gehör . . . . . . . . 433

**X. Licht** (Optik).

313. Licht. Lichtquellen . . 434
314. Nichtleuchter. Diffuse Zurückwerfung . . . . . 435
315. Durchsichtigkeit . . . . 435
316. Geradlinige Fortpflanzung. Schatten . . . . . . . . 436
317. Dunkelkammer . . . . 438
318. Sehwinkel . . . . . . . 439
319. Photometrie . . . . . . 439
320. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts . . . 443
321. Gesetz der Zurückwerfung 445
322. Anwendungen ebener Spiegel . . . . . . . . . 446
323. Winkelspiegel . . . . . 447
324. Spiegelsextant . . . . 448
325. Kugelspiegel. (Sphärische Spiegel) . . . . . . . . 449
326. Brechung. Totalreflexion . 455
327. Luftspiegelung . . . . 461
328. Planparallele Platten . . 462
329. Prisma . . . . . . . . 463
330. Linsen . . . . . . . . 465
331. Brechung durch eine Kugelfläche . . . . . . . . 472
332. Linsensysteme . . . . 473
333. Sphärische Abweichung (Aberration) . . . . . . 475
334. Mikroskop . . . . . . . 475
335. Fernrohr . . . . . . . 477
336. Farbenzerstreuung . . . 481
337. Regenbogen . . . . . . 484
338. Halo . . . . . . . . . 485
339. Reines Spektrum . . . 486
340. Fraunhofersche Linien . 487
341. Spektrometer . . . . . 488
342. Achromatismus . . . . 489
343. Spektralapparate . . . . 491
344. Ausstrahlung (Emission) . 493
345. Absorption des Lichts . 495
346. Fluorescenz. Ultraviolette Strahlen . . . . . . . . 499
347. Phosphorescenz. Ultrarote Strahlen . . . . . . . . 501
348. Wärmewirkung der Strahlen 502

| | Seite |
|---|---|
| 349. Abhängigkeit der Strahlung von der Temperatur. Energiespektrum | 505 |
| 350. Radiometer | 508 |
| 351. Chemische Wirkung des Lichts. Photographie | 508 |
| 352. Energie der Sonnenstrahlung | 510 |
| 353. Fresnels Spiegelversuch | 513 |
| 354. Wellenlängen. Schwingungszahlen | 516 |
| 355. Das Huygenssche Prinzip | 517 |
| 356. Erklärung der Zurückwerfung und Brechung | 518 |
| 357. Dopplersches Prinzip | 522 |
| 358. Beugung (Diffraktion, Inflexion) des Lichts | 523 |
| 359. Gitter | 526 |
| 360. Hof | 528 |
| 361. Farben dünner Blättchen | 530 |
| 362. Stehende Lichtwellen | 531 |
| 363. Photographie der Farben | 532 |
| 364. Polarisation des Lichts | 533 |
| 365. Doppelbrechung | 539 |
| 366. Polarisationsapparate | 545 |
| 367. Chromatische Polarisation | 546 |
| 368. Drehung der Polarisationsebene | 551 |
| 369. Magnetische Drehung der Polarisationsebene | 562 |
| 370. Weitere Beziehungen zwischen elektrischen und Lichterscheinungen | 563 |
| 371. Hertzsche Versuche. Elektromagnetische Lichttheorie | 564 |
| 372. Das Auge | 568 |
| 373. Reduzirtes Auge | 569 |
| 374. Accommodation | 569 |
| 375. Sehen mit zwei Augen | 570 |
| 376. Stereoskop | 571 |
| 377. Dauer des Lichteindrucks | 573 |
| 378. Das Stroboskop | 573 |
| 379. Farbenempfindung | 575 |

# Einleitung.

1. **Physik.** Natur (griechisch physis) nennen wir den Inbegriff alles sinnlich Wahrnehmbaren. Das raumerfüllende Etwas, welches auf unsere Sinne wirkt, nennen wir Materie oder Stoff. Körper heifst jeder von Stoff erfüllte begrenzte Raum. Veränderungen in der Körperwelt, die sich nach dem Zeugnis unserer Sinne im Laufe der Zeit vollziehen, nennen wir Erscheinungen.

Der Name „Physik“ bedeutet sonach eigentlich „Naturwissenschaft“ oder „Naturlehre“ überhaupt und würde sich daher seinem Wortsinn nach auf sämtliche Naturerscheinungen beziehen. Im Altertum hatte das Wort Physik auch in der That diese umfassende Bedeutung. Die grofse Menge und Verschiedenheit der Thatsachen liefs es aber im Laufe der Zeit wünschenswert erscheinen, die Vorgänge an Tieren und Pflanzen, welche das Leben derselben ausmachen, einer besonderen Gruppe von Wissenschaften, den biologischen, zuzuweisen und die überaus mannigfaltigen Erscheinungen, welche auf der Änderung der Zusammensetzung der Körperteilchen beruhen, in einer selbständigen Wissenschaft, der Chemie, zu behandeln. Im heutigen Sinne verstehen wir unter Physik die Lehre von denjenigen Erscheinungen, an welchen weder das Leben noch eine Änderung in der Zusammensetzung der beteiligten Körper einen wesentlichen Anteil hat.

Die Physik, gleich den anderen Naturwissenschaften eine empirische oder Erfahrungswissenschaft, geht von einzelnen Erfahrungssätzen aus, welche sie durch Beobachtungen und Versuche (Experimente) gewinnt und durch folgerichtige Verallgemeinerung unter gemeinsame Gesichtspunkte zusammenfafst. So gelangt sie zur Kenntnis von Naturgesetzen, deren jedes, indem es in rein äufserlicher Weise den Zusammenhang einer gewissen Gruppe von Erscheinungen ausspricht, nur über das Wie, nicht aber über das Warum des Geschehens Aufschlufs gibt. Die letztere Frage, nämlich die Frage nach dem inneren Zusammenhange der Erscheinungen, kann überhaupt nicht durch die Erfahrung allein beantwortet werden. Soll ihre Beantwortung versucht werden, so bleibt nichts anderes übrig, als wissenschaftliche Vermutungen oder Hypothesen aufzustellen und zuzusehen, ob sich aus der gemachten Annahme die Erscheinungen, welche sie erklären soll, folgerecht entwickeln lassen. Sind sämtliche Folgerungen aus einer Hypothese mit den Thatsachen im Einklang, so darf die angenommene Ursache als möglich betrachtet werden, und sie wird um so wahrscheinlicher, je mehr Thatsachen sich aus ihr erklären.

Je nach der Art der Darstellung unterscheidet man die Experimentalphysik, welche die vorgetragenen Lehren unmittelbar aus der Erfahrung entnimmt und durch Versuche erläutert (wie es in dem vorliegenden Werke geschieht), von der theoretischen Physik, welche aus wenigen an die Spitze gestellten Erfahrungssätzen und Hypothesen ihr Lehrgebäude durch bloſse Denkprozesse entwickelt und erst hinterher die Übereinstimmung der Ergebnisse mit der Erfahrung nachweist. Da die letztere sich bei ihren Schluſsfolgerungen der Mathematik als unentbehrlichen Hilfsmittels bedient, wird sie auch als mathematische Physik bezeichnet.

2. **Messung. Maſseinheiten.** Um die Erscheinungen in ihrem Verlaufe genau zu verfolgen, ist es notwendig, die dabei vorkommenden Gröſsen, wie Raum, Zeit u. a., durch Messung mit nach Übereinkunft gewählten gleichartigen Maſseinheiten zu vergleichen. Besonders wichtig sind die Raummessungen, welche sich sämtlich auf Längenmessungen zurückführen lassen.

Als Längeneinheit gilt heutzutage fast überall das Meter, nach der ursprünglichen Festsetzung der 40 000 000. Teil des Erdmeridians. Man hat 1791 in Frankreich auf Vorschlag einer akademischen Kommission diese Bestimmung getroffen, um ein der Natur selbst entnommenes und daher der Vergänglichkeit aller willkürlichen Maſse nicht unterworfenes Maſs zu erhalten. Da jedoch die damals ausgeführten Messungen des Erdmeridians, wie man später erkannte, fehlerhaft ausgefallen sind, so ist das aus ihnen abgeleitete und seitdem gesetzlich eingeführte Meter dem 40 000 000. Teile des Meridians nicht genau gleich, sondern ein wenig (um 0,0858 mm) kürzer. Der Zweck, ein Naturmaſs zu erhalten, wurde also nicht erreicht, und das gesetzliche Meter ist nun doch ein willkürliches Maſs, welches 1799 verkörpert wurde durch den im Staatsarchiv zu Paris als Urmeter hinterlegten Endmaſsstab aus Platin, seit 1889 aber dargestellt wird durch einen Strichmaſsstab aus Platin-Iridium (einer Legirung aus 90 % Platin und 10 % Iridium von stahlgleicher Festigkeit); derselbe wird im internationalen Bureau für Maſs und Gewicht in Sèvres bei Paris als internationales Prototyp des Meters aufbewahrt, und gibt die Länge des Meters durch den Abstand an, welchen zwei auf seiner Oberfläche eingeritzte Endstriche bei der Temperatur des schmelzenden Eises zeigen. Der alte Platinstab mit rechteckigem Querschnitt war wegen seiner geringen Dicke zu biegsam. Wenn aber ein Stab sich biegt, so wird seine konvexe Seite etwas länger und seine konkave Seite verkürzt sich ein wenig; im Innern des Stabes muſs sonach eine Schicht von Längsfasern vorhanden sein, welche sich bei einer Biegung weder verlängern noch verkürzen; sie bilden die sogenannte neutrale Schicht. Für den Querschnitt des neuen Stabes wählte man daher die in Fig. 1 in wirklicher Gröſse dargestellte Form, bei welcher die Endstriche auf der

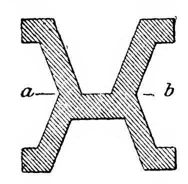


Fig. 1.
Querschnitt des Meter-Prototyps.

neutralen Schicht $ab$, die als Grundfläche der oberen Rinne des Stabes freiliegt, angebracht werden konnten. Diese Form des Querschnitts bietet außerdem noch den Vorteil, daß der Stab mehr als bei anderen Formen gegen Biegung geschützt ist.

Das Meter (m) wird bekanntlich eingeteilt in 10 Decimeter (dm), 100 Centimeter (cm), 1000 Millimeter (mm) und ist demnach ein zehnteiliges oder Decimalmaß. Der tausendste Teil eines Millimeters heißt ein Mikron ($\mu$). Eine Länge von 1000 m heißt ein Kilometer (km) und dient als größere Einheit zur Messung von Weglängen. Von früher gebräuchlichen oder ausländischen Längenmaßen sind die bemerkenswertesten:

| | |
|---|---|
| Preußischer oder rheinischer Fuß | = 313,9 mm |
| Bayerischer Fuß . . . . . . . | = 291,9 „ |
| Badischer u. schweizerischer Fuß | = 300,0 „ |
| Sächsischer Fuß . . . . . . | = 283,2 „ |
| Österreichischer (Wiener) Fuß . | = 316,1 „ |
| Pariser Fuß . . . . . . . . . | = 324,8 „ |
| Englischer Fuß (1/3 Yard) . . . | = 304,8 „ |
| Deutsche oder geograph. Meile . | = 7,420 km |
| Englische Meile . . . . . . | = 1,609 „ |
| Seemeile . . . . . . . . . . | = 1,855 „ |

Ein wichtiges Hilfsmittel bei genauen Längenmessungen ist der Nonius oder Vernier, ein kleiner Maßstab ($B$ Fig. 2), der sich entlang einem größeren ($AA$) verschieben läßt und die Messung von kleineren Teilen gestattet, als auf dem Hauptmaßstabe unmittelbar angegeben sind. Teilt man nämlich auf dem kleinen Maßstabe eine Strecke, welche gleich 9 Teilen des Hauptmaßstabes ist, in 10 gleiche Teile, so beträgt jeder dieser Teile $^9/_{10}$ von einem Teil des Hauptmaßstabes. Um eine bis zum Nullstrich des Nonius reichende Länge zu messen, sieht man zu, der wievielte Teilstrich des Nonius (in der Figur der dritte) mit einem Teilstrich des Maßstabes am genauesten zusammentrifft; dann ist der vorhergehende zweite Teilstrich um $^1/_{10}$, der erste um $^2/_{10}$ und der Nullstrich um $^3/_{10}$ gegen den benachbarten Teilstrich des Maßstabes verschoben; man hat demnach zu der bis zum Nullstrich des Nonius in ganzen Teilen des Maßstabes abgelesenen Länge noch so viele Zehntel hinzuzufügen, als der mit einem Strich des Maßstabes zusammentreffende Teilstrich des Nonius angibt; in unserem Beispiel (s. Figur) beträgt also die Ablesung 27,3. Den Namen Nonius führt diese sinnreiche Einrichtung nach ihrem angeblichen Erfinder Pedro Nuñez (1542), den Namen Vernier nach dem wahren Erfinder Pierre Vernier (1631).

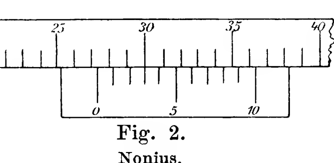


Fig. 2.
Nonius.

Zur Messung von Höhenunterschieden (z. B. von Flüssigkeitssäulen) dient das Kathetometer (Dulong und Petit, 1818), ein lotrechter Maßstab, längs welchem ein in wagrechter Ebene drehbares Fernrohr

samt daran befestigtem Nonius auf- und abgeschoben werden kann, dessen horizontale durch das Fadenkreuz angegebene Visirlinie nacheinander auf die Höhenmarken eingestellt wird.

Flächeneinheit ist das Quadratmeter (qm, $m^2$), d. i. ein Quadrat von 1 m Seitenlänge. Ein qm enthält 100 qdm ($dm^2$), 10000 qcm ($cm^2$), 1000000 qmm ($mm^2$).

Als Einheit des Rauminhaltes (Kubikinhaltes oder Volumens) dient das Kubikmeter (cbm, $m^3$), d. i. ein Würfel von 1 m Seitenlänge. Als kleinere Raumeinheit, namentlich als Hohlmafs für Flüssigkeiten, dient das Kubikdecimeter (cdm, $dm^3$) oder Liter (l); es enthält 1000 Kubikcentimeter (ccm, $cm^3$).

Winkelmessungen kommen auf Messung von Bogenlängen zurück. Winkeleinheit ist der Grad ($^0$), d. h. der 90. Teil eines rechten Winkels. Der Grad wird eingeteilt in 60 Minuten ($'$), die Minute in 60 Sekunden ($''$). Ein Winkel kann auch gemessen werden durch die Länge des Bogens, den er als Centriwinkel in einem Kreise vom Radius 1 zwischen seine Schenkel fafst. Der Bogenlänge 1 entspricht der Winkel $57{,}296^0$ und dem Halbkreis von $180^0$ die Bogenlänge $\pi = 3{,}14159 \ldots$ (Ludolfsche Zahl).

Als Einheit der Zeit gilt in der Physik die Sekunde (sec, Zeitsekunde), d. i. der 86400. Teil des mittleren Sonnentages; 60 Sekunden geben eine Minute, 60 Minuten eine Stunde, 24 Stunden einen Tag.

Andere Mafseinheiten und Mefswerkzeuge werden später zur Sprache kommen.

---

# I. Bewegung.

## (Mechanik.)

3. **Bewegung und Ruhe.** Wir sagen, ein Körper oder ein Punkt desselben sei in Bewegung, wenn er im Laufe der Zeit seinen Ort im Raume ändert, dagegen er sei in Ruhe, wenn er seine Lage im Raume nicht ändert.

Wir beurteilen die Ruhe oder die Bewegung eines Körpers durch Vergleichung seiner Lage mit derjenigen der umgebenden Körper, von welchen wir annehmen, dafs sie in Ruhe seien. Betrachten wir z. B. die Bewegung eines Bahnzuges, so beziehen wir dieselbe auf die als ruhend gedachte Erdoberfläche, indem wir ihn an Bäumen, Felsen, Häusern vorübereilen sehen. Hält der Zug an einer Station still, so befindet er sich in Ruhe in Beziehung auf das Stationsgebäude oder in Beziehung auf die Erde; da aber die Erde selbst sich um ihre Achse dreht und in ihrer Bahn um die Sonne fortschreitet, so ist die Ruhe des stillstehenden Bahnzuges keine wirkliche oder absolute, sondern nur eine auf die Erde, welche wir als ruhend annehmen, „bezügliche" oder relative. — Die Orte, welche ein in Bewegung begriffener Punkt nacheinander einnimmt, bilden in ihrer ununterbrochenen Aufeinanderfolge eine gerade oder krumme Linie, den Weg oder die Bahn des Punktes; darnach heifst die Bewegung entweder gerad- oder krummlinig. Bei geradliniger Bahn ist die Richtung der Bewegung unveränderlich und wird durch die Bahn selbst vorgezeichnet, ein krummlinig bewegter Punkt dagegen ändert fortwährend seine Bewegungsrichtung; die Richtung, nach welcher er sich in irgend einem Zeitpunkt bewegt, wird offenbar durch die gerade Linie angegeben, welche die krummlinige Bahn an der von dem Punkt augenblicklich eingenommenen Stelle berührt. Wir nennen eine Bewegung gleichförmig, wenn der sich bewegende Punkt in gleichen Zeitabschnitten, wie klein man dieselben auch annehmen mag, stets gleiche Strecken seiner Bahn durchläuft, ungleichförmig dagegen, wenn er in gleichen Zeiten ungleiche Strecken zurücklegt.

4. **Gleichförmige Bewegung.** Die von einem gleichförmig bewegten Punkt längs seiner Bahn in der Zeiteinheit (1 Sekunde) zurückgelegte Wegstrecke nennen wir seine Geschwindigkeit; sie ist eine „Richtungsgröfse", da sie nicht nur durch ihre Gröfse, sondern auch durch ihre Richtung bestimmt wird. Bezeichnen wir die Geschwindigkeit mit $c$ (celeritas) und den in $t$ (tempus) Sekunden zurückgelegten Weg mit $s$ (spatium), so ist offenbar $s = ct$. Sind zwei dieser drei

Gröſsen $s$, $c$ und $t$ gegeben, so läſst sich mittels dieser Gleichung die dritte leicht bestimmen. So findet man z. B., wenn $s$ und $t$ bekannt sind,

$$c = \frac{s}{t} \cdot$$

Die Geschwindigkeit eines gleichförmig bewegten Punktes wird also erhalten, indem man die Zahl der durchlaufenen Längeneinheiten dividirt durch die Zahl der dabei verflossenen Zeiteinheiten; sie wird ausgedrückt durch das Verhältnis einer Länge zu einer Zeit. Die Zahl, welche die Geschwindigkeit angibt, kann für eine und dieselbe Bewegung verschieden ausfallen je nach der Wahl der Einheiten der Länge und der Zeit, oder je nach der Wahl der Geschwindigkeitseinheit. Man muſs daher, um Irrungen zu vermeiden, die zu Grunde gelegten Einheiten jedesmal angeben, indem man z. B. sagt, ein Bahnzug besitzt die Geschwindigkeit 12 $\frac{\text{m}}{\text{sec}}$ (Meter in der Sekunde), oder 1200 $\frac{\text{cm}}{\text{sec}}$, oder 720 $\frac{\text{m}}{\text{min}}$ (Meter in der Minute), und durch die Schreibweise $\frac{\text{cm}}{\text{sec}}$ oder auch cm $\text{sec}^{-1}$ u. s. w. zugleich ersichtlich macht, wie die Einheit der Geschwindigkeit aus den Grundeinheiten der Länge und der Zeit abgeleitet ist.

5. **Bewegung und Kraft. Schwerkraft. Gewicht. Gleichgewicht zweier Kräfte.** Die Erfahrung lehrt uns, daſs wir im stande sind, einen Körper durch die Anstrengung unserer Muskeln in Bewegung zu setzen, indem wir einen Zug oder Druck auf ihn ausüben. Wir bezeichnen jede Einwirkung dieser Art auf einen Körper als eine „Kraft, die am Körper angreift“. Umgekehrt, wenn wir wahrnehmen, daſs ein Körper in Bewegung gerät, oder seine ihm schon innewohnende Bewegung ändert, so schreiben wir diesen Vorgang der Wirkung einer „Kraft“ zu. Wir beobachten z. B., daſs jeder Körper, der nicht unterstützt oder aufgehängt ist, gegen die Erde hin in eine immer schneller werdende, eine sogenannte beschleunigte Bewegung gerät und zu Boden fällt, und wir erblicken in diesem Vorgange die Wirkung einer besonderen Kraft, die wir die Schwerkraft nennen.

Wir können das Fallen eines Körpers aber auch verhindern, indem wir z. B. den Körper mit der Hand unterstützen. Wir müssen alsdann eine bestimmte Muskelanstrengung, einen ganz bestimmten Druck oder Zug nach oben hin ausüben, um den Körper zu halten oder zu tragen. Dasselbe Verhalten können wir objektiv wahrnehmen, wenn wir den Körper an einem Kautschukfaden oder einer Spiralfeder aufhängen; wir sehen dann, daſs der Faden oder die Feder sich um einen bestimmten Betrag ausdehnt. Ebenso biegt sich die Unterlage, auf die wir einen Körper stellen, um einen gewissen, in den meisten Fällen unmerkbar kleinen Betrag. In allen diesen Fällen ist der Körper in Ruhe, aber nicht weil gar keine Kraft auf ihn einwirkt, sondern weil zwei Kräfte nach entgegengesetzter Rich-

tung angreifen und ihre Wirkung gegenseitig aufheben. Die Schwerkraft, die den Körper in Bewegung zu setzen sucht, erscheint hier als ein Zug oder Druck, den der Körper nach unten hin auf die Aufhängevorrichtung oder die Unterlage ausübt; man nennt diese Äufserung der Schwerkraft das „Gewicht" des Körpers. Nach oben hin aber wirkt eine zweite Kraft auf den Körper, die Muskelkraft des Armes, der Aufdruck der eingebogenen Unterlage oder die Zugkraft der gespannten Feder. Wenn der Körper in Ruhe bleibt, so sagen wir, die beiden Kräfte halten sich das Gleichgewicht.

6. **Mafs der Kraft. Ihre Richtung und ihre Gröfse.** Die Möglichkeit, einer Kraft durch eine andere das Gleichgewicht zu halten, gewährt uns ein bequemes Mittel, um Kräfte zu messen. Jede Kraft ist durch zwei Eigenschaften charakterisiert, durch ihre Richtung und ihre Gröfse (Stärke, Intensität); sie ist, wie die Geschwindigkeit, eine Richtungsgröfse. Halten sich zwei Kräfte das Gleichgewicht, so werden sie erstens einander genau entgegen gerichtet sein. Man kann daher z. B. die Richtung der Schwerkraft erkennen an der Richtung des Fadens, der einen Körper trägt; denn die in der Längsrichtung des Fadens wirkende Spannung hält ja der Schwerkraft das Gleichgewicht. Man nennt diese einfache Vorrichtung Lot oder Senkel, und die dadurch angegebene Richtung lotrecht, senkrecht oder vertikal. Eine Ebene, auf der das Lot senkrecht steht, und jede in ihr gezogene Linie heifst wagrecht oder horizontal.

Zweitens aber werden wir zwei Kräfte, wenn sie sich, in entgegengesetzter Richtung an einem Körper angreifend, das Gleichgewicht halten, als gleich grofs bezeichnen. Wir können daher Kräfte miteinander vergleichen, indem wir z. B. die Dehnungen einer Feder vergleichen, die ihnen das Gleichgewicht halten. Kräfte sind gleich, wenn sie gleiche Dehnungen derselben Feder verursachen. Einen solchen Apparat nennt man ein Federdynamometer (vgl. 52, Elasticität). Da wir die gleichen Dehnungen der Feder auch durch angehängte Gewichte hervorrufen können, so sind wir in der Lage, alle Kräfte mit Gewichten zu vergleichen und von jeder Kraft anzugeben, welches Gewicht den gleichen Zug oder Druck wie jene Kraft ausüben würde. Diese Vergleichung läfst sich auch direkt ausführen, da wir mit Hilfe von Seilen und Rollen den Zug eines Gewichtes in jede beliebige Richtung übertragen und so einer gegebenen Kraft von bestimmter Richtung durch ein passend gewähltes Gewicht das Gleichgewicht halten können. Diese Art, die Kräfte zu messen, nennt man das statische oder, da im besonderen in den praktischen Fällen der Technik davon Gebrauch gemacht wird, das technische Kraftmafs.

Wir hatten aber ursprünglich die Kraft als die Ursache der Bewegung eingeführt und wir können Richtung und Gröfse der Kraft daher auch durch die Richtung und Gröfse der von ihr bewirkten Bewegung ausdrücken. So können wir z. B. als Richtung der Schwerkraft auch diejenige Richtung bezeichnen, in der ein Körper fällt,

wenn er ohne Anstoſs losgelassen wird. Um aber auch die Gröſse einer Kraft durch die Geschwindigkeit des von ihr in Bewegung gesetzten Körpers ausdrücken zu können, bedarf es vorerst einer Untersuchung darüber, wie sich die Geschwindigkeit eines Körpers unter der dauernden Einwirkung einer Kraft gestaltet. Diese Frage ist zuerst von Galilei (1602) für die Fallbewegung beantwortet worden.

7. **Fallmaschine. Gleichförmig beschleunigte Bewegung.** Die Bewegung eines frei fallenden Körpers erfolgt schon innerhalb einer Sekunde so rasch, daſs es unmöglich wird, ihren Verlauf genau zu verfolgen. Schon Galilei, der Entdecker der Fallgesetze (1602), war darauf bedacht, die Fallbewegung, ohne ihr Wesen zu ändern, langsamer zu machen, indem er das Fallen längs einer geneigten Ebene (Fallrinne) beobachtete. Geeigneter hierzu und zu vielfacher Abänderung der Versuche brauchbar ist die Atwoodsche Fallmaschine (1784). Dieselbe (Fig. 3) trägt auf einer etwa 2 m hohen Säule ein leichtes, gut drehbares Rad, das am Rand behufs Aufnahme eines dünnen Fadens ausgehöhlt ist. An beiden Enden des Fadens hängen gleiche Gewichte $P$; jedes derselben ist bestrebt, zu fallen und dabei das Rad nach seiner Seite hin zu drehen. Da aber dieses Bestreben nach beiden Seiten hin das gleiche ist, so kann eine Drehung des Rades und ein Fallen der Gewichte nicht stattfinden. Legt man aber auf das vordere Gewicht ein kleines Übergewicht $p$, so wird jetzt nach dieser Seite hin ein Herabfallen wirklich eintreten. Die bewegende Kraft ist hierbei nur das Gewicht der Zulage. Lieſse man die Zulage für sich allein frei herabfallen, so hätte diese Kraft nur die Zulage selbst in Bewegung zu setzen und anzutreiben: hier aber hat dieselbe Kraft nicht bloſs das Übergewicht $p$, sondern auch noch die beiden gleichen Gewichte $P$ mitzunehmen, und die Bewegung geht deshalb viel langsamer vor sich. An der Säule der Fallmaschine ist seitlich ein Pendel $r$ angebracht, welches Sekunden schlägt und mit dem ersten Schlage eine oben am Nullpunkt einer Centimeterabteilung befindliche Fallbrücke auslöst, welche das mit dem Übergewicht belastete Gewicht trägt. Dieses Gewicht beginnt nun herabzusinken und trifft hörbar auf eine wagrechte Metallplatte, welche längs der Säule verschoben und in beliebiger Höhe festgestellt werden kann. Man ermittelt nun zuerst durch Probiren, wie groſs der Fallraum in der ersten Sekunde ist, d. h. wo man die Platte anbringen muſs, damit das fallende Gewicht mit dem zweiten Pendelschlage (nach 1 sec)

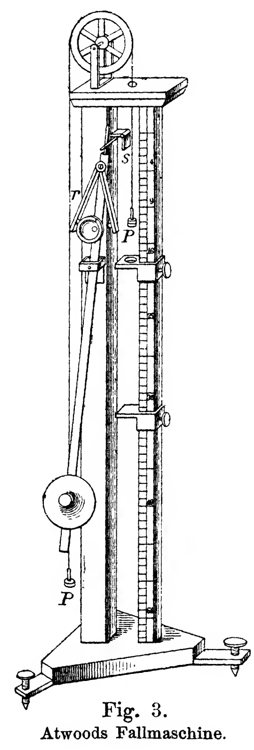


Fig. 3.
Atwoods Fallmaschine.

auf sie trifft. Dann bestimmt man ebenso die Fallräume nach zwei, drei, vier, fünf u. s. w. Sekunden und findet:

| | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| der | Fallraum | in | 2 | sec | ist | 4mal | so | groſs | als | in | der | 1. sec |
| „ | „ | „ | 3 | „ | „ | 9 | „ | „ | „ | „ | „ | 1. „ |
| „ | „ | „ | 4 | „ | „ | 16 | „ | „ | „ | „ | „ | 1. „ |

u. s. w. Es ergibt sich also, daſs *die Fallräume sich verhalten wie die Quadrate der Fallzeiten.*

Da der Fallraum in den zwei ersten Sekunden 4mal so groſs ist als in der ersten, so durchläuft der Körper in der zweiten Sekunde einen 3mal so groſsen Weg als in der ersten, ebenso in der dritten einen 5mal, in der vierten einen 7mal so groſsen Weg als in der ersten Sekunde. *Die Fallräume in den einzelnen Sekunden verhalten sich also wie die ungeraden Zahlen*, 1, 3, 5, 7, 9, ...

Die beobachtete Fallbewegung ist demnach eine ungleichförmige Bewegung, und zwar eine beschleunigte, weil in jeder folgenden Sekunde ein gröſserer Weg durchlaufen wird, als in der vorhergehenden, ihre Geschwindigkeit wächst stetig und unaufhörlich.

Nun fragt es sich, was unter Geschwindigkeit einer ungleichförmigen Bewegung zu verstehen sei. Bei der gleichförmigen Bewegung konnten wir sagen, die Geschwindigkeit ist der in jeder Sekunde zurückgelegte Weg. Hier aber hat diese Definition keinen Sinn mehr, denn die Geschwindigkeit ändert sich von Augenblick zu Augenblick. Diese Änderung kann aber nur bewirkt sein durch die unaufhörlich abwärts ziehende Kraft des Übergewichts, welche den Körper vom Zustande der Ruhe aus in Bewegung setzt und ihn dann zu immer schnellerer Bewegung antreibt. Wenn in irgend einem Augenblick die Ursache der Beschleunigung, das Übergewicht, beseitigt würde, so könnte von da an die Geschwindigkeit nicht mehr zunehmen, sondern müſste den Wert unverändert beibehalten, den sie in jenem Augenblick besaſs. Wir können daher die Geschwindigkeit, welche ein ungleichförmig bewegter Körper in irgend einem Augenblick besitzt, durch die Wegstrecke ausdrücken, welche er von diesem Zeitpunkte an in jeder folgenden Sekunde gleichförmig zurücklegen würde, wenn von da an jede Ursache der Bewegungsänderung wegfiele. Die Richtigkeit dieser Überlegungen läſst sich an der Fallmaschine leicht nachweisen. Wir bringen nämlich an der Säule eine durchbrochene Platte an, welche durch ihre Öffnung wohl das herabsinkende Gewicht, nicht aber das über ihren Rand vorstehende Übergewicht durchläſst, und sehen deutlich, daſs nach Beseitigung des Übergewichts eine weitere Geschwindigkeitsänderung nicht mehr eintritt, sondern das Gewicht sich von nun an gleichförmig weiter bewegt. Stellen wir die durchbrochene Platte an das Ende des bereits ermittelten Fallraumes der ersten Sekunde, so daſs das Übergewicht nach der ersten Fallsekunde abgehoben wird, so finden wir, daſs das nun sich selbst überlassene Gewicht mit dem folgenden Pendelschlage auf die massive Platte trifft, wenn diese um den doppelten Fallraum der ersten Sekunde unter der durchbrochenen Platte angebracht ist;

auch in jeder folgenden Sekunde legt der Körper das Doppelte des Fallraumes der ersten Sekunde zurück, wie man sich überzeugt, wenn man die massive Platte doppelt, dreimal etc. soweit unter der durchbrochenen Platte aufstellt, und das Aufschlagen des Gewichtes nach 2, 3 etc. Sekunden beobachtet. Die Geschwindigkeit am Ende der ersten Sekunde ist also (dem Zahlenwert nach) doppelt so grofs als der Fallraum der ersten Sekunde.

Bringen wir die durchbrochene Platte am Ende des in zwei Sekunden zurückgelegten Fallraumes an, dann am Ende des Fallraumes der drei ersten Sekunden u. s. w., und ermitteln jedesmal die Stellung, welche der massiven Platte gegeben werden mufs, damit sie bei dem folgenden Pendelschlage getroffen wird, so finden wir:

| | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Die | Geschwindigkeit | nach | 2 | sec | ist | 2 mal | so | grofs | als | nach | 1 | sec |
| " | " | " | 3 | " | " | 3 " | " | " | " | " | 1 | " |
| " | " | " | 4 | " | " | 4 " | " | " | " | " | 1 | " |

u. s. f. Es ergibt sich also: Die Geschwindigkeiten verhalten sich wie die verflossenen Fallzeiten, oder die Geschwindigkeit ist der Fallzeit proportional.

Die Geschwindigkeit des fallenden Körpers nimmt also in jeder Sekunde um den Betrag des doppelten Fallraumes der ersten Sekunde zu. Man nennt die Zunahme der Geschwindigkeit pro Sekunde die Beschleunigung, und da dieser Geschwindigkeitszuwachs für jede Sekunde der nämliche ist, so nennt man die betrachtete Bewegung eine gleichförmig beschleunigte.

8. **Gesetze der gleichförmig beschleunigten Bewegung.** Möglichst kurz und übersichtlich lassen sich diese Gesetze in der mathematischen Zeichensprache ausdrücken. Bezeichnen wir die Beschleunigung mit $a$ (acceleratio), so ist die Geschwindigkeit $v$ (velocitas) nach $t$ Sekunden, $at$, oder es ist

1) $$v = at.$$

Der Fallraum der ersten Sekunde ist alsdann $^1/_2 a$; nach $t$ sec ist er $tt$ oder $t^2$ mal so grofs, also $^1/_2 at^2$, und man hat

2) $$s = {}^1/_2 at^2.$$

Durch diese beiden Gleichungen, von denen die erste die Geschwindigkeit, die zweite den zurückgelegten Weg für jeden Augenblick $t$ angibt, sind alle Umstände der gleichförmig beschleunigten Bewegung erschöpfend beschrieben, und wir können mit ihrer Hilfe jede auf diese Bewegung bezügliche Frage beantworten. Würde z. B. nach der Geschwindigkeit $v$ gefragt, welche ein Körper besitzt, nachdem er mit der gleichförmigen Beschleunigung $a$ den Weg $s$ durchlaufen hat, so ergibt sich aus der Gleichung 2) die hierzu erforderliche Zeit:

$$t = \sqrt{\frac{2s}{a}},$$

welche man nach Gleichung 1) nur noch mit $a$ zu multipliziren braucht, um die verlangte Endgeschwindigkeit:

$$v = \sqrt{2as}$$

oder auch:

3) $$v^2 = 2as$$

zu erhalten; d. h. das Quadrat der Geschwindigkeit ist in jedem Augenblick gleich dem doppelten Produkt aus Beschleunigung und Weglänge, demnach die Geschwindigkeit selbst gleich der Quadratwurzel aus diesem Produkt.

9. **Geschwindigkeit und Beschleunigung bei beliebig ungleichförmiger Bewegung.** Die Änderung der Geschwindigkeit eines ungleichförmig bewegten Punktes ist offenbar um so geringer, je kleiner das Zeitteilchen ist, während dessen man die Bewegung betrachtet. Denkt man sich dieses Zeitteilchen immer kleiner und kleiner, so nähert sich die Bewegung immer mehr einer gleichförmigen und ihre Geschwindigkeit wird dann ausgedrückt durch das Verhältnis $\Delta s/\Delta t$, wenn $\Delta s$ die kleine Wegstrecke vorstellt, die in der kleinen Zeit $\Delta t$ zurückgelegt wird. Statt der obigen Definition der Geschwindigkeit einer ungleichförmigen Bewegung kann man also auch die folgende, ganz allgemein giltige geben: Unter der Geschwindigkeit, die ein bewegter Punkt in irgend einem Zeitpunkt besitzt, versteht man den Grenzwert, dem sich das Verhältnis des Weges im nächsten kleinen Zeitteilchen zu der Dauer dieses Zeitteilchens nähert, wenn man sich das Zeitteilchen und daher auch die zugehörige Wegstrecke immer kleiner und kleiner denkt.

Bei der gleichförmig beschleunigten Bewegung verstanden wir unter Beschleunigung die Zunahme der Geschwindigkeit in der Zeiteinheit (sec), oder überhaupt das Verhältnis dieser Zunahme zu der Zeit, in welcher sie erfolgt. Während eines hinreichend kleinen Zeitteilchens können wir aber auch eine ungleichförmig beschleunigte Bewegung als gleichförmig beschleunigt betrachten, und ihre Beschleunigung durch das Verhältnis $\Delta v/\Delta t$ ausdrücken, wenn $\Delta v$ die kleine Geschwindigkeitsänderung bezeichnet, welche während der kleinen Zeit $\Delta t$ eintritt. Unter Beschleunigung versteht man also ganz allgemein den Grenzwert, dem sich das Verhältnis der Geschwindigkeitsänderung zu dem entsprechenden kleinen Zeitteilchen um so mehr nähert, je kleiner man dieses Zeitteilchen annimmt. Da eine Geschwindigkeitsänderung selbst eine Geschwindigkeit ist, so wird eine Beschleunigung gemessen durch das Verhältnis einer Geschwindigkeit zu einer Zeit, und die Einheit der Beschleunigung wird erhalten, wenn man die Einheit der Geschwindigkeit (das Verhältnis der Längen- und Zeiteinheit cm $\sec^{-1}$) durch die Zeiteinheit dividirt. Die Einheit der Beschleunigung wird daher für cm und sec bezeichnet durch cm $\sec^{-1}$ : sec oder durch cm $\sec^{-2}$. Auf die Einheiten der Länge und Zeit zurückgeführt, wird also eine Beschleunigung ausgedrückt durch das Verhältnis einer Länge zum Quadrate einer Zeit (wie schon

aus Gleichung 2) hervorgeht, aus welcher $a = 2s/t^2$ erhalten wird). Solche Ausdrücke, wie cm $sec^{-1}$ für die Geschwindigkeit und cm $sec^{-2}$ für die Beschleunigung, welche die Zusammensetzung dieser abgeleiteten Begriffe aus einfacheren Grundbegriffen (hier Länge und Zeit) kennzeichnen, nennt man die „Dimensionen“ (Ausmessungen) jener zusammengesetzten Begriffe.

10. **Beschleunigung des freien Falles.** Die Versuche an der Fallmaschine lassen sich noch mannigfach abändern. Läſst man bei gleichem Gesamtgewicht $2P+p$ verschiedene Übergewichte einwirken, so findet man, daſs die erzeugten Beschleunigungen sich verhalten wie die Übergewichte, oder wie die einwirkenden Kräfte. Lassen wir das Gesamtgewicht $2P+p$ einmal an der Fallmaschine unter dem Einfluſs der Kraft $p$, sodann frei herabfallen, d. i. unter dem Einfluſs der Kraft $2P+p$, so erhalten wir bei jenem Versuch eine an der Fallmaschine zu messende Beschleunigung $a$, bei diesem aber die noch zu bestimmende Beschleunigung $g$ des freien Falles. Diese Beschleunigungen müssen sich aber verhalten wie die einwirkenden Kräfte, folglich hat man:

$$g : a = 2P+p : p\,,$$

woraus man findet:

$$g = a \cdot \frac{2P+p}{p}\,.$$

Genauer als durch solche Versuche findet man die Beschleunigung des freien Falles durch ein später zu erwähnendes Verfahren. Sie ergiebt sich zu:

$$g = 981 \text{ cm sec}^{-2} \text{ oder } g = 9{,}81 \text{ m sec}^{-2},$$

und daraus der Fallraum in der ersten Sekunde $\frac{1}{2}g = 4{,}9$ m. Die Gesetze des freien Falles sind unmittelbar gegeben durch die Gleichungen 1), 2) und 3), wenn man in ihnen $g$ statt $a$ setzt.

11. **Masse.** Wir können nunmehr die oben aufgeworfene Frage, wie wir die Gröſse einer Kraft durch die von ihr bewirkte Bewegung ausdrücken können, dahin beantworten, daſs wir die stets gleiche Beschleunigung, welche ein Körper unter dem Einfluſs einer dauernd wirkenden, unveränderlichen Kraft empfängt, als Maſs für die Gröſse dieser Kraft ansehen können. Aber die Beschleunigung, die eine Kraft erteilt, hängt nicht bloſs von der Kraft, sondern auch von dem Körper ab, auf den sie wirkt. Läſst man an der Fallmaschine das gleiche Übergewicht $p$ auf verschiedene Gesamtgewichte einwirken, so ergibt sich, daſs die erzeugten Beschleunigungen sich umgekehrt verhalten, wie die Gesamtgewichte, und zwar gleichviel, aus welchem Stoffe die Gewichte auch bestehen mögen. Von der letzteren Thatsache überzeugt man sich, wenn man den Gewichten $P$ die Form cylindrischer Gefäſse giebt, in welche man verschiedene feste oder flüssige Stoffe bis zum gleichen Gewichte füllt. Man kann das gefundene Ergebnis auch so ausdrücken: Ein Körper setzt der Beschleunigung

durch eine Kraft einen Widerstand entgegen, der seinem Gewicht proportional ist. Diesen Beschleunigungswiderstand nennt man die Masse des Körpers. Die Massen verschiedener Körper verhalten sich sonach wie ihre Gewichte und können daher durch Wägung verglichen werden. Der gewöhnliche Sprachgebrauch versteht unter „Masse" so viel wie „Stoffmenge" oder „Quantität der Materie". Dafs bei Körpern aus demselben Stoff, z. B. Wasser und Eis, die in ihnen enthaltene Stoffmenge ihrem Gewicht proportional ist und sonach die Begriffe Masse und Stoffmenge sich decken, ist ohne weiteres klar. Für ungleichartige Körper dagegen, wie Wasser und Quecksilber, vermögen wir über die Stoffmenge unmittelbar nichts auszusagen, wir schreiben ihnen aber gleiche Masse zu, wenn ihnen dieselbe Kraft die nämliche Beschleunigung erteilt, was zutrifft, wenn ihre Gewichte gleich sind.

Die Beschleunigung, welche eine Kraft einem Körper erteilt, ist also direkt proportional der Kraft und umgekehrt proportional seiner Masse. Verschiedene Kräfte erzeugen daher die nämliche Beschleunigung, wenn die Massen, auf welche sie wirken, in demselben Verhältnis stehen wie die Kräfte. Dies findet statt beim freien Fall der Körper. Alle fallenden Körper erleiden (an demselben Orte der Erde) dieselbe Beschleunigung; ein Kilogrammgewichtstück wird zwar mit 1000 mal gröfserer Kraft zu Boden gezogen als ein Grammgewicht, jenes enthält aber auch eine 1000 mal gröfsere Masse als dieses, und erfährt deshalb doch dieselbe Beschleunigung. Alle Körper fallen gleich schnell. Diesem Satze scheint allerdings die tägliche Erfahrung zu widersprechen. Wir sehen Flaumfedern, Schneeflocken, Seifenblasen und andere Körper, deren Oberfläche im Verhältnis zu ihrem Gewicht sehr grofs ist, viel langsamer fallen, als Steine, Metallstücke u. dergl. Es erklärt sich dies daraus, dafs jeder bewegte Körper durch die Luft einen Widerstand erleidet, der um so gröfser ist, eine je gröfsere Oberfläche, senkrecht zur Bewegungsrichtung gerechnet, der Körper darbietet, und der sich daher um so mehr geltend macht, je gröfser die Oberfläche des Körpers im Verhältnis zur beschleunigenden Kraft ist. Dafs alle Körper im luftleeren Raum gleich schnell fallen, läfst sich durch die Fallröhre nachweisen, ein weites Glasrohr, aus welchem die Luft (mittels einer Luftpumpe) entfernt werden kann. In der nahezu luftleeren Röhre sieht man Flaumfedern, Papierschnitzel und Schrotkörner mit der gleichen Geschwindigkeit fallen.

Der Luftwiderstand wächst auch mit der Geschwindigkeit des bewegten Körpers. Bei der verlangsamten Bewegung an der Fallmaschine kommt der Luftwiderstand wenig in Betracht, beim freien Fall aber wirkt er derart verzögernd, dafs die Bewegung mit der Zeit immer mehr gleichförmig zu werden strebt. Die obigen Gesetze der gleichförmig beschleunigten Bewegung gelten mit voller Strenge nur unter der Voraussetzung, dafs aufser der beschleunigenden Kraft keine anderen Kräfte auf den bewegten Körper einwirken. Bei der Fallmaschine aber wirken aufser dem Luftwiderstand noch hindernd die Reibung an der Achse des Rades, der Widerstand des Fadens gegen

Biegung, der Beschleunigungswiderstand des Rades und des Fadens. Man kann sich jedoch überzeugen, dafs sich jene Gesetze um so genauer ergeben, je sorgfältiger man darauf bedacht ist, diese unvermeidlichen Hindernisse zu vermindern oder ihren Einflufs in Rechnung zu bringen.

12. **Einheiten der Masse und der Kraft.** Wir wählen die Einheiten der Masse und der Kraft zweckmäfsig so, dafs die Masseneinheit unter der Wirkung der Krafteinheit die Beschleunigung 1 erlangt. Wir können alsdann, wenn die Kraft $f$ der Masse $m$ die Beschleunigung $a$ erteilt, den Satz, dafs die Beschleunigung der Kraft direkt, der Masse umgekehrt proportional ist, in Kürze so schreiben:

$$a = \frac{f}{m}, \text{ oder auch } f = m\,a.$$

Die letztere Form drückt aus, dafs die Kraft stets gleich ist dem Produkt der Masse mit der Beschleunigung, gleichviel, ob sie den angegriffenen Körper wirklich beschleunigt, oder sich durch Zug oder Druck auf ein ruhendes Hindernis äufsert.

Haben wir für eine der beiden Gröfsen, Masse oder Kraft, die Einheit gewählt, so ist die Einheit der anderen durch die Gleichung $f = m\,a$ mitbestimmt. Je nachdem die Wahl getroffen wird, ergeben sich verschiedene Mafssysteme.

Als Einheit der Masse gilt das Gramm (g), die Masse eines Kubikcentimeters reinen Wassers bei $4^0$ C.; ihr tausendfacher Betrag ist das Kilogramm (kg), der hundertste Teil des Grammes heifst Centigramm (cg), der tausendste Milligramm (mg). Als Normal- oder Urmafs dient ein Kilogrammstück aus Platin-Iridium, das in dem internationalen Bureau für Mafs und Gewicht zu Paris aufbewahrt wird und den obigen Definitionen mit möglichster Genauigkeit entspricht.

Unter Benutzung dieser Einheit ist die Krafteinheit diejenige Kraft, welche der Grammmasse in 1 sec einen Geschwindigkeitszuwachs von $1 \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$ erteilt. Man nennt diese Krafteinheit Dyne und bezeichnet diese Art die Kraft zu messen als das dynamische Kraftmafs. Die Schwerkraft, welche auf ein Grammgewicht wirkt, erteilt ihm eine Beschleunigung 981 cm sec$^2$ und beträgt daher 981 Dynen, oder 1 Dyne ist gleich dem Druck, den $\frac{1}{981}$ g oder 1,02 mg auf die Unterlage ausübt.

Andererseits haben wir oben (6) gesehen, dafs wir die Kräfte auch durch Gewichte ausdrücken können. Für die praktischen Zwecke der Ingenieur- und Maschinenmechanik ist diese Art des Kraftmafses viel bequemer und daher in der Technik allgemein gebräuchlich. Als Einheit der Kraft nimmt man hier das Gewicht eines Kilogramms. Mifst man die Kraft in der angedeuteten Weise

statisch, d. h. im Gleichgewichte mit anderen bekannten Kräften, und drückt ihre Gröfse in Kilogrammgewichten aus, so kann man diese Werte auch leicht auf das dynamische Kraftmafs umrechnen, indem man berücksichtigt, dafs das Gewicht eines Kilogramms, d. i. sein Druck auf die Unterlage = 981000 Dynen ist. Doch gilt letztere Zahl nur für unsere Breite. Das technische Mafssystem, in dem die Kräfte durch Gewichte gemessen werden, hat den Nachteil, dafs das Gewicht eines Körpers an verschiedenen Stellen der Erdoberfläche verschieden ist. Der Druck eines Grammstückes auf die Unterlage beträgt bei uns 981, am Äquator 978, am Pol 983 Dynen (vgl. u. 41), auf dem Planeten Mars nur 395 Dynen. Eine und dieselbe Kraft würde daher im technischen Mafssysteme an verschiedenen Stellen der Erde durch verschiedene Zahlen ausgedrückt werden.

Von diesem Übelstand ist das oben erörterte dynamische Kraftmafs frei, weil es auf der Verwendung der Begriffe Länge, Zeit und Masse beruht, die vom Orte unabhängig sind. Deswegen pflegt man dieses Mafssystem auch als das absolute, oder im Gegensatz zu dem technischen als das wissenschaftliche Mafssystem zu bezeichnen, weil man es allen wissenschaftlichen Messungen zu Grunde zu legen pflegt.

Zu den bisher gebrauchten Grundeinheiten der Länge und der Zeit tritt nun noch diejenige der Masse als dritte Grundeinheit hinzu. Auf die drei Einheiten der Länge, der Masse und der Zeit lassen sich alle in der Physik vorkommenden Gröfsen zurückführen. Dabei pflegt man als Einheiten jener Gröfsen das Centimeter, das Gramm und die Sekunde zu benutzen, und bezeichnet aus diesem Grunde das absolute Mafssystem auch wohl als das Centimeter-Gramm-Sekunden-System. Die Einheit der Kraft insbesondere wird erhalten als Produkt der Masseneinheit mit der Einheit der Beschleunigung, und hat daher im Centimeter-Gramm-Sekunden-System die Dimension cm g $\sec^{-2}$ (Dyne).

13. **Allgemeine Gesetze der Bewegung.** Die Verallgemeinerung der an der Fallmaschine gemachten Wahrnehmungen führt zu einigen Sätzen von umfassender Bedeutung, aus welchen die Gesetze aller Bewegungserscheinungen abgeleitet werden können, und die man daher Prinzipien oder Grundsätze der Mechanik nennt.

Wir haben gesehen, dafs nach Beseitigung der treibenden Kraft (des Übergewichts) der fallende Körper mit der erlangten Geschwindigkeit in gleichförmiger Bewegung geradlinig weiterging, dafs er in dem Bewegungszustand beharrte, in den er versetzt worden war. Um ihn schneller oder langsamer gehen zu machen, oder um ihn von der eingeschlagenen geradlinigen Bahn abzulenken, bedarf es einer äufseren Kraft; von sich selbst aus kann ein Körper seinen Bewegungszustand nicht ändern, ebensowenig, als er von selbst (ohne die Einwirkung einer Kraft) aus dem Zustand der Ruhe in den der Bewegung übergehen kann. Darin besteht der erste Grundsatz der Bewegungs-

lehre, das Gesetz der Trägheit (inertia) oder des Beharrungsvermögens, welches von Galilei zuerst erkannt und von Newton in folgenden Worten ausgesprochen wurde: „Jeder Körper verharrt in seinem Zustande der Ruhe oder der gleichförmigen Bewegung in geradliniger Bahn, solange er nicht durch einwirkende Kräfte gezwungen wird, diesen Zustand zu ändern.“

Diesem Satze, welcher eigentlich nichts enthält als die Bestimmung des Begriffes „Kraft“, scheinen auf den ersten Blick die beobachteten Thatsachen zu widersprechen, weil bei allen Bewegungen, die wir hervorrufen, hemmende Kräfte einwirken, die wir niemals völlig beseitigen können. Das Gewicht an der Fallmaschine kommt nach Wegnahme des Übergewichts endlich doch zur Ruhe, weil Reibung und Luftwiderstand seine Bewegung immer mehr verzögern. Ein Eisenbahnzug auf horizontalem Geleise, ein Schiff auf dem Wasser kommen zur Ruhe, sobald die Maschine still steht und die treibende Kraft damit aufhört. Wir können uns aber überzeugen, daſs eine einmal eingeleitete und sich selbst überlassene Bewegung um so länger fortdauert, je geringer die entgegenwirkenden Hindernisse sind; wir sehen z. B. eine Kugel auf glatter Eisfläche (bei geringem Reibungswiderstand) viel weiter fortrollen, als auf rauhem Boden. Der vollgiltige Beweis für die Richtigkeit des Gesetzes wird übrigens dadurch geliefert, daſs alle daraus gezogenen Folgerungen mit den Thatsachen übereinstimmen.

Die Versuche an der Fallmaschine haben ferner gelehrt, daſs die treibende Kraft in gleichen Zeitabschnitten immer die gleiche, der Kraft proportionale Geschwindigkeitszunahme hervorbrachte, gleichviel, ob der fallende Körper vom Zustande der Ruhe ausging oder sich bereits in irgend einem Stadium seiner Bewegung befand. Diese Beboachtungen führen zu dem zweiten, ebenfalls von Galilei aufgestellten Grundgesetz, welches mit Newtons Worten lautet: „Die Änderung der Bewegung ist der einwirkenden Kraft proportional und findet in der Richtung der Geraden statt, in welcher die Kraft einwirkt.“ Eben weil in diesem Satze nicht gesagt ist, ob der Körper, auf welchen die Kraft einwirkt, im Zustand der Ruhe oder irgend einer Bewegung sich befinde, drückt derselbe aus, daſs die Wirkung der Kraft unabhängig ist von der Gröſse und Richtung einer etwa vorhandenen Bewegung oder von dem Vorhandensein anderer an dem Körper angreifender Kräfte, oder daſs jede Kraft in der ihr eigenen Stärke und Richtung wirkt, unbekümmert um das Dasein anderer Kräfte. Man nennt daher diesen Satz auch das Unabhängigkeitsprinzip. An der Fallmaschine allerdings hatte die einwirkende Kraft die nämliche Richtung wie die bereits vorhandene Bewegung. Daſs der Satz aber ganz allgemein gilt, welche Richtung die Kräfte auch haben mögen, lehrt die gewöhnliche Erfahrung. Beim Billardspiel an Bord eines Dampfers werden die Kugeln durch die auf sie wirkenden Kräfte ganz ebenso bewegt, wenn das Schiff und mit ihm die Kugeln in Bewegung sind, als wenn das

Schiff in Ruhe ist, und ein Körper, den wir vertikal herabfallen lassen, trifft dieselbe Stelle des Bodens der Kajüte, ob nun das Schiff und mit ihm der Körper sich fortbewegt oder stillsteht.

Das dritte Newtonsche Grundgesetz lautet:

„Bei jeder Wirkung ist immer eine gleiche und entgegengesetzte Gegenwirkung vorhanden, oder die Wirkungen, welche irgend zwei Körper aufeinander ausüben, sind immer gleich und entgegengesetzt gerichtet“, oder kurz: „Wirkung und Gegenwirkung sind einander gleich.“ Ein Stein z. B., der auf einem Tisch liegt und auf denselben einen Druck nach abwärts ausübt, erleidet von seiten des Tisches einen ebenso grofsen Gegendruck nach aufwärts. Ein Pferd wird durch die angespannten Stränge mit ebenso grofser Kraft gegen den Wagen zurückgezogen, mit welcher es den Wagen vorwärts zieht; der Wagen hemmt das Fortschreiten des Pferdes in demselben Grad, in welchem seine Vorwärtsbewegung durch dieses gefördert wird. Ein Magnet, der ein Stück Eisen anzieht, wird von dem Eisen in entgegengesetzter Richtung ebenso stark angezogen. Mit derselben Kraft, mit welcher die Erde den Mond anzieht, wird sie wieder von dem Mond angezogen. Beim Abfeuern eines Gewehrs erhält die Kugel durch die Explosion des Pulvers einen ebenso grofsen Antrieb nach vorwärts wie das Gewehr nach rückwärts gegen die Schulter des Schützen.

14. **Vertikaler Wurf.** Gestützt auf diese Grundsätze kann man nun ohne Versuche, durch blofse Überlegung (Rechnung), die Bewegungsgesetze eines Körpers oder eines Massenpunktes finden und gleichsam voraussagen, wenn die auf ihn wirkenden Kräfte gegeben sind. So wie die Schwerkraft, mufs jede nach Gröfse und Richtung unveränderliche oder konstante Kraft auch eine konstante Beschleunigung, also eine gleichförmig beschleunigte Bewegung hervorbringen, deren Geschwindigkeit mit der Zeit gleichmäfsig wächst.

Da die Geschwindigkeit des fallenden Körpers gleichmäfsig, d. h. in gleichen Zeiten um gleich viel, wächst, so mufs er in einem gegebenen Zeitraum denselben Weg durchlaufen, den er in derselben Zeit mit einer unverändert gleichbleibenden Geschwindigkeit zurücklegen würde, welche zwischen den Geschwindigkeiten, die er am Anfang und am Ende jenes Zeitraums hatte, gerade in der Mitte liegt, oder mit der Geschwindigkeit, welche er in der Mitte dieses Zeitraums einen Augenblick besafs. Am Anfang der ersten Sekunde, als er seinen Fall begann, war seine Geschwindigkeit Null, am Ende der ersten Sekunde betrug sie $g$, die mittlere Geschwindigkeit der ersten Fallsekunde ist demnach $^1/_2\, g$; mit dieser Geschwindigkeit eine Sekunde lang sich gleichmäfsig fortbewegend, würde er einen Weg $= {}^1/_2\, g$ zurücklegen; demnach ist der Weg, den er in der ersten Sekunde mit seiner von Null bis $g$ wachsenden Geschwindigkeit thatsächlich zurücklegt, gleich der halben Beschleunigung ($^1/_2\, g$). Betrachten wir die ersten zwei Fallsekunden, so ist die Anfangsgeschwindigkeit wieder Null, die Endgeschwindigkeit $2g$, die mittlere Geschwindigkeit also $g$; mit dieser zwei Sekunden lang dahineilend,

würde er einen Weg von $2g = \frac{1}{2}g \cdot 4$ durchlaufen, welcher viermal so grofs ist als der in der ersten Sekunde zurückgelegte, u. s. f. Ist der Körper allgemein $t$ sec lang gefallen, so hat er denselben Weg $s$ durchlaufen, als wenn er mit der Geschwindigkeit $\frac{1}{2}gt$, der mittleren zwischen seiner Anfangsgeschwindigkeit 0 und seiner Endgeschwindigkeit $gt$, sich $t$ sec lang gleichförmig fortbewegt hätte. Es ist demnach $s = \frac{1}{2}gt \cdot t$ oder $s = \frac{1}{2}gt^2$. Aus den beiden Gleichungen $v = gt$ und $s = \frac{1}{2}gt^2$ ergibt sich dann noch, wie früher schon gezeigt, für die Geschwindigkeit $v$ am Ende des Fallraumes $s : v^2 = 2gs$.

Hat man dem Körper im Augenblicke des Loslassens einen Stofs nach abwärts erteilt, hat man ihn abwärts geworfen mit einer Anfangsgeschwindigkeit $c$, so behält er diese vermöge der Trägheit bei, gleichzeitig aber wird seine abwärts gerichtete Geschwindigkeit durch die Schwerkraft in $t$ sec um $gt$ vermehrt, gerade so, als wenn er vom Ruhezustand ausgegangen wäre, so dafs er nach $t$ sec die Geschwindigkeit $v = c + gt$ besitzt. Infolge der Trägheit allein würde der Körper mit der Anfangsgeschwindigkeit $c$ in gleichförmiger Bewegung während $t$ sec den Weg $ct$ durchlaufen; die gleichzeitig wirkende Schwerkraft fügt aber noch die Strecke $\frac{1}{2}gt^2$ hinzu, so dafs er nach $t$ sec thatsächlich den Weg $s = ct + \frac{1}{2}gt^2$ zurückgelegt hat. Der Körper bewegt sich gleichförmig beschleunigt so, als ob er eine Fallbewegung, welche ihm die Geschwindigkeit $c$ vorher erteilt hat, einfach fortsetzte.

Wird ein Körper vertikal aufwärts geworfen, so wird seine Anfangsgeschwindigkeit $c$, die er vermöge der Trägheit beizubehalten strebt, durch die abwärts wirkende Schwerkraft in jeder sec um $g$ vermindert, so dafs er nach $t$ sec die Geschwindigkeit $v = c - gt$ besitzt, und statt des Weges $ct$, den er infolge des Beharrungsvermögens nach aufwärts durchlaufen würde, nur den Weg $s = ct - \frac{1}{2}gt^2$ zurückgelegt hat, indem die Schwerkraft ihn gleichzeitig um $\frac{1}{2}gt^2$ nach abwärts zieht. Der Körper steigt mit gleichförmig verzögerter Bewegung empor, bis im höchsten Punkte seiner Bahn seine Geschwindigkeit Null geworden ist (was im Zeitpunkte $t' = c/g$ eintritt). Hier scheint er einen Augenblick stillzustehen, und fällt alsdann nach den Gesetzen des freien Falles zu seinem Ausgangspunkt wieder herab. Da sich beim Herabfallen seine Geschwindigkeit ganz in derselben Weise vermehrt, wie sie sich beim Steigen vermindert hatte, so braucht er zum Herabfallen ebenso lange Zeit wie zum Steigen, passirt jeden Punkt seiner Bahn nach abwärts mit derselben Geschwindigkeit, mit welcher er ihn vorher nach aufwärts passirte, und langt unten an mit derselben Geschwindigkeit, mit welcher er emporgeschleudert worden (aus der Gleichung $v = c - gt$ folgt $v = -c$ für $t = 2c/g$). Die höchste Höhe, welche er erreicht hatte, ist demnach gleich der Höhe, von welcher er herabfallen mufs, um eine seiner Anfangsgeschwindigkeit gleiche Endgeschwindigkeit zu erlangen; die Steighöhe des aufwärts geworfenen Körpers wird also, den Fallgesetzen zufolge, gefunden, indem man das Quadrat der Anfangs-

geschwindigkeit durch die doppelte Beschleunigung dividirt. (Aus der Gleichung $s = ct - {}^1/_2 g t^2$ ergibt sich die Steighöhe $s' = c^2/2g$, wenn man $t' = c/g$ statt $t$ in sie einsetzt.) Dieselben Gleichungen gelten selbstverständlich für jede gleichförmig verzögerte Bewegung; es ist nur statt $g$ der jedesmalige Wert $a$ der Beschleunigung (resp. Verzögerung) zu setzen.

15. **Horizontaler und schiefer Wurf.** Wirft man einen Körper in schiefer Richtung ($AG$, Fig. 4) aufwärts, so würde er, wenn die Schwere nicht wirkte, sich vermöge der Trägheit in gerader Linie mit der ihm beim Wurf erteilten Geschwindigkeit fortbewegen, in gleichen Zeiten die gleichen Wegstrecken $AB$, $BC$, $CD$ etc. durchmessend. Die Schwere aber zieht ihn unausgesetzt von dieser geradlinigen Bahn nach abwärts und bewirkt, dafs er nach den Zeitabschnitten 1, 2, 3, 4 ... um die Strecken $Bb$, $Cc$, $Dd$, $Ee$ ..., welche sich verhalten wie die Quadrate der Zeiten, also wie 1, 4, 9, 16 ..., unter jene Linie hinabgesunken ist, so dafs die krumme Linie $Abcdefg$ die wirkliche Flugbahn des geworfenen Körpers darstellt. Eine solche krumme Linie, deren einzelne Punkte gefunden werden, wenn man von den Punkten einer geraden Linie ($AG$) aus parallele Strecken ($Bb$, $Cc$, $Dd$ ...) aufträgt, welche sich verhalten wie die Quadrate der von dem Anfangspunkt $A$ gemessenen zugehörigen Strecken ($AB$, $AC$, $AD$...) der geraden Linie, wird Parabel genannt. Bei einem schräg aufwärts geworfenen Körper besteht die Wurflinie aus einem aufsteigenden ($Ad$) und einem absteigenden Parabelast ($dg$), welche einander gleich sind und in gleichen Zeiten durchlaufen werden. Die Wurfweite, d. h. die Entfernung ($Ag$), in welcher der Körper die durch seinen Ausgangspunkt gelegte Horizontalebene wieder trifft, ist für ein und dieselbe Anfangsgeschwindigkeit am gröfsten, wenn der Körper unter einem Winkel von 45° in die Höhe geworfen wird. Wird ein Körper in wagrechter Richtung geworfen, so beschreibt er den absteigenden Ast einer Parabel ($Af'$, Fig. 5); er erreicht den Boden bei $f'$ nach derselben Zeit, die er braucht, um von $A$ bis $f$ frei herabzufallen, wie sich aus der Zeichnung unmittelbar ergibt. Die parabolische Gestalt der Wurflinie können wir an jedem Wasserstrahl gleichsam verkörpert sehen und auch sonst durch Messungen nachweisen. Durch diese Übereinstimmung des thatsächlichen Verhaltens mit den aus den Grundsätzen gezogenen Folgerungen wird die Richtigkeit jener Grundsätze aufs

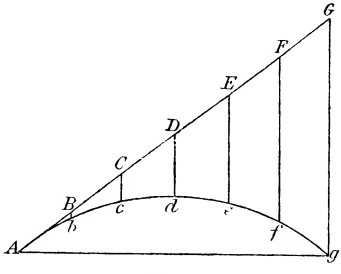


Fig. 4.
Schiefer Wurf.

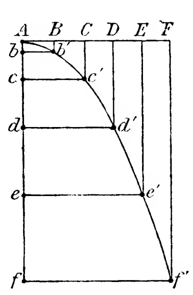


Fig. 5.
Horizontaler Wurf.

neue bestätigt. Bei dieser Ableitung der Gesetze der Wurfbewegung wurde freilich vorausgesetzt, dafs auf den geworfenen Körper kein merkliches Hindernis einwirke. Ein in der Atmosphäre geworfener Körper ist aber stets dem Widerstand der Luft, der bei grofser Geschwindigkeit, wie bei Geschossen, sehr beträchtlich werden kann, ausgesetzt, und wird dadurch von der rein parabelförmigen in eine etwas andere Bahn, welche steiler abfällt als ansteigt, die ballistische Kurve, abgelenkt.

16. **Bewegungsgröfse. Stofskraft.** Da die Beschleunigung $a$, welche eine beliebige Kraft $f$ einer Masse $m$ erteilt,

$$a = \frac{f}{m}$$

ist, so können wir in die Gleichungen der gleichförmig beschleunigten (und verzögerten) Bewegung (8) die Kraft und die Masse einführen, wenn wir in ihnen $f/m$ statt $a$ setzen. Die Gesetze 1) und 3) der gleichförmig beschleunigten Bewegung, welche eine Masse $m$ unter der Einwirkung einer konstanten Kraft $f$ annimmt, sprechen sich dann in den folgenden Gleichungen aus:

$$1)\ mv = ft \qquad 3)\ fs = {}^1/_2 mv^2.$$

Die Gleichung 1) sagt aus; „Das Produkt aus der bewegten Masse und der erreichten Geschwindigkeit ist gleich dem Produkt aus der konstanten Kraft und der Zeit, während welcher sie gewirkt hat.“ Das Produkt aus der Masse eines Körpers und seiner Geschwindigkeit nennt man seine Bewegungsgröfse oder die Quantität der Bewegung, dasjenige aus Kraft und Wirkungszeit den Antrieb (Impuls) der Kraft. Man kann also auch sagen: Der Antrieb der Kraft ist gleich der erzeugten Bewegungsgröfse. Wirkt eine Kraft nur während einer unmefsbar kurzen Zeit auf einen Körper, so nennt man sie Stofskraft oder weniger gut momentane Kraft. Die Gröfse einer Stofskraft selbst läfst sich nicht angeben, sondern man beurteilt sie nach der von ihr bewirkten Bewegungsgröfse. Eine nach diesem Mafse gemessene Stofskraft ist also keine Kraft, sondern ein Impuls (von der Dimension cm g $sec^{-1}$); der Körper, den sie in Bewegung setzte, geht mit der erlangten Geschwindigkeit $v$ in gleichförmiger Bewegung geradlinig weiter, so lange nicht andere Kräfte auf ihn einwirken.

Eine solche Stofskraft ist z. B. der Druck der Pulvergase, welcher beim Abfeuern eines Geschützes nach vorwärts auf das Geschofs und ebenso stark und während der nämlichen kleinen Zeit nach rückwärts auf das Geschütz wirkt. Geschofs und Geschütz erhalten also gleiche Impulse, und deshalb sind auch ihre Bewegungsgröfsen einander gleich, oder es ist, wenn $m$ und $m'$ ihre resp. Massen, $v$ und $v'$ die zugehörigen Geschwindigkeiten bezeichnen, $mv = m'v'$, d. h. die Geschwindigkeit des Geschosses und diejenige des Geschützes beim Rückstofs verhalten sich umgekehrt wie ihre Massen.

17. **Arbeit.** Wenn eine Kraft den Körper, an dem sie angreift, fortbewegt, so sagt man, die Kraft arbeite, und nennt den Erfolg ihrer Wirkung ihre Arbeit. Wenn wir ein Kilogrammgewicht 1 m hoch in die Höhe heben, so leisten wir damit eine Arbeit von ganz bestimmter Gröfse; wir leisten offenbar eine doppelt so grofse Arbeit, wenn wir das Kilogramm 2 m hoch, oder auch, wenn wir 2 kg 1 m hoch heben, und die sechsfache Arbeit, wenn wir 3 kg 2 m hoch emporschaffen. Die geleistete Arbeit ist hienach einerseits dem überwundenen Widerstand oder der ihm gleichen, zu seiner Überwindung aufgewendeten Kraft, und andererseits dem Weg proportional, der hierbei in der Richtung der Kraft zurückgelegt wurde. Wählt man daher als Einheit der Arbeit diejenige, welche die Krafteinheit längs der Wegstrecke 1 wirkend vollbringt, so wird jede Arbeit ausgedrückt durch das Produkt aus der Kraft oder dem von ihr überwundenen Widerstand und dem Weg, längs welchem sie wirkte. Im praktischen Mafssystem dient hienach als Arbeitseinheit das Meterkilogramm oder Kilogrammmeter (mkg); im absoluten Mafssystem das Erg, nämlich die Arbeit, welche die Kraft 1 Dyne, durch die Wegstrecke 1 cm wirkend, leistet (Dimension $cm^2$ g $sec^{-2}$). Das wäre die Arbeit, die man leistet, wenn man 1,02 mg 1 cm hoch hebt. Da diese Arbeit aufserordentlich klein ist, so hat man daneben eine gröfsere Einheit eingeführt: 1 Joule $= 10^7$ Erg, eine Arbeit, die erforderlich ist, um 1,02 kg 10 cm hoch zu heben. Ein Meterkilogramm beträgt 98100000 Erg oder 9,81 Joule.

Bei der Verwendung von Kräften zur Arbeit kommt es nicht blofs darauf an, dafs eine Arbeit überhaupt gethan werde, sondern auch, dafs dies in bestimmter Frist geschehe. Man nennt die in 1 sec geleistete Arbeit den Effekt oder die Leistung der Kraft. Im praktischen Maschinenbetriebe gebraucht man als gröfsere Einheit die Pferdekraft oder Pferdestärke (P.S.), nämlich die Leistung von 75 Meterkilogramm in der Sekunde. Die Arbeitsleistung eines kräftigen Mannes wird zu $^1/_{12}$ bis $^1/_7$ Pferdekraft angeschlagen. Im absoluten Mafssystem dient als Einheit des Effekts das Erg pro sec (Dimension $cm^2$ g $sec^{-3}$) oder als gröfsere Einheit das „Watt" = 1 Joule pro sec = $^1/_{736}$ Pferdekraft und als noch gröfsere Einheit das Kilowatt = 1000 Joule/sec. Eine Pferdestärke ist $= 75 \times 9{,}81 = 736$ Watt; 1 Kilowatt = 1,36 Pferdestärke.

Im praktischen Leben wird heutzutage häufig auch der Ausdruck Wattstunde, bezw. Kilowattstunde gebraucht. 1 Wattstunde ist die Arbeit, welche eine Maschine von 1 Watt Leistung innerhalb einer Stunde liefert, also 3600 Joule oder 367 Meterkilogramm; eine Kilowattstunde ist das Tausendfache davon.

18. **Wucht.** In der Gleichung

$$fs = {}^1/_2 mv^2 \qquad (3)$$

ist das links stehende Produkt aus Kraft und Weg nichts anderes als die von der Kraft geleistete Arbeit. In Worten ausgesprochen sagt uns also diese Gleichung: Wenn eine Masse $m$, vom Zustand der

Ruhe ausgehend, von einer konstanten Kraft durch den Weg $s$ hindurch bewegt wird, und am Ende dieses Weges die Geschwindigkeit $v$ erlangt hat, so ist die hierbei von der Kraft entwickelte Arbeit gleich dem halben Produkt aus der Masse und dem Quadrat der erlangten Geschwindigkeit.

Jede in Bewegung befindliche Masse vermag nun einen Widerstand, d. h. eine ihrer Bewegung entgegenwirkende Kraft $f'$, auf eine gewisse Wegstrecke $s'$ zu überwinden, indem sie dabei, wenn die entgegenwirkende Kraft konstant bleibt, eine gleichförmig verzögerte Bewegung annimmt und endlich zur Ruhe kommt. Wir wissen aber aus den Gesetzen der gleichförmig verzögerten Bewegung (14), daſs ein mit der Anfangsgeschwindigkeit $v$ ausgehender Körper zur Ruhe kommt, nachdem er den Weg

$$s' = \frac{v^2}{2a'}$$

durchlaufen hat, wenn $a'$ die seiner Bewegung entgegenwirkende Beschleunigung bedeutet. Setzen wir in dieser Gleichung $f'/m$ statt $a'$, so erhalten wir:

3′) $$f' s' = {}^1\!/_2 m v^2,$$

oder in Worten: die Arbeit, welche die bewegte Masse $m$ zu leisten vermag, wenn sie auf einen Widerstand $f'$ so lange einwirkt, bis ihre Anfangsgeschwindigkeit $v$ erschöpft ist, ist gleich dem halben Produkt aus der Masse und dem Quadrat ihrer Anfangsgeschwindigkeit.

Vergleicht man diesen Satz (3′) mit dem vorigen (3), so erkennt man, daſs die Arbeit, welche eine konstante Kraft leisten muſs, um einer ruhenden Masse eine bestimmte Geschwindigkeit zu erteilen, genau so groſs ist, wie die Arbeit, welche diese Masse vermöge dieser Geschwindigkeit in Überwindung eines Widerstandes wieder leisten kann, bis sie zur Ruhe kommt. Denn beide Arbeiten werden durch den nämlichen Ausdruck dargestellt, nämlich durch das halbe Produkt aus der Masse und dem Quadrat ihrer Geschwindigkeit; man nennt diesen Ausdruck ${}^1\!/_2 m v^2$ die Wucht oder auch mit einem weniger geeigneten Namen (nach Leibniz) die lebendige Kraft der bewegten Masse.

Die ausgesprochenen Sätze gelten übrigens nicht bloſs für konstante, sondern auch für beliebig veränderliche Kräfte. Denn jede veränderliche Kraft kann während eines hinreichend kleinen Zeitteilchens als konstant angesehen und ihre Arbeit durch das Produkt ihres augenblicklichen Wertes mit der kleinen in diesem Zeitteilchen durchlaufenen Wegstrecke ausgedrückt werden. Die während eines beliebigen Zeitraumes geleistete Arbeit ist die Summe dieser kleinen Produkte und ergibt sich immer gleich dem halben Produkt der bewegten Masse mit dem Quadrat der Endgeschwindigkeit. Auch die Annahme, daſs der Körper vom Ruhezustande ausgehe oder in diesen Zustand zurückkehre, ist für die Giltigkeit dieser Sätze nicht erforderlich. Denn angenommen, der Körper bewege sich von der Ruhe aus unter dem

Einfluſs der Kraft $f$ durch die Strecke $s$ und erlange dabei die Geschwindigkeit $v$, und dann noch weiter bis $s'$, wo er die Geschwindigkeit $v'$ erlangt hat, so ist $fs = {}^1/_2 mv^2$ und $fs' = {}^1/_2 mv'^2$, also auch $f(s' - s) = {}^1/_2 m(v'^2 - v^2)$, d. h. der Zuwachs an Wucht ist gleich dem Zuwachs an Arbeit.

Wir können demzufolge eine bewegte Masse gleichsam als ein Magazin betrachten, in welchem die Arbeit, die verwendet werden muſste, um sie in Bewegung zu setzen oder ihre Geschwindigkeit zu steigern, aufgespeichert ist und dann beliebig, ohne Verlust, aber auch ohne Gewinn, wieder zur Besiegung von Widerständen aufgebraucht werden kann.

19. **Energie.** Das Vermögen eines Körpers, Arbeit zu leisten, oder seine Wirkungsfähigkeit nennt man ganz allgemein Energie; sie wird durch die Gröſse der Arbeit, welche der Körper auszugeben vermag, in Arbeitseinheiten gemessen. Die Wucht oder „lebendige Kraft“, welche einem bewegten Körper innewohnt, ist demnach Energie. Aber nicht nur bewegte Körper, sondern auch solche, welche sich in Ruhe befinden, können Energie besitzen. Wird z. B. ein in die Höhe geworfener Stein, wenn er sich im höchsten Punkt seiner Bahn befindet, von dem Dach eines Hauses aufgefangen, so bleibt er daselbst liegen ohne Bewegung, jedoch nicht ohne das Vermögen, Arbeit zu leisten, und daher nicht ohne Energie. Denn läſst man ihn von dort wieder zum Boden herabfallen, so erreicht er ihn mit der nämlichen Geschwindigkeit und sonach mit derselben Wucht, welche er beim Aufwärtswerfen besaſs, und vermag daher jetzt eine Arbeit zu verrichten ebenso groſs wie diejenige, welche zum Hinaufwerfen aufgewendet wurde. Die Energie, welche dem ruhig auf dem Dach liegenden Stein innewohnt und welche beim Herabfallen als Wucht seiner Bewegung zum Vorschein kommt, verdankt derselbe seiner erhöhten Lage, d. h. dem Umstand, daſs er von der ihn anziehenden Erde weiter entfernt ist, als da er noch am Boden lag. Man nennt diese im ruhenden Körper gleichsam aufgespeicherte Arbeitsfähigkeit deswegen Energie der Lage, ruhende oder potentielle Energie und bezeichnet im Gegensatz hierzu die Wucht eines bewegten Körpers als Energie der Bewegung, thätige, aktuelle oder kinetische Energie. Die zum Spannen einer Armbrust verbrauchte Arbeit befindet sich als ruhende Energie in der gespannten Sehne und verwandelt sich beim Abdrücken in die thätige Energie oder Wucht des fortgeschleuderten Pfeils. Die Arbeit, welche unsere Hand beim Aufziehen einer Uhr leistet, geht als ruhende Energie in die gespannte Feder oder in das emporgehobene Gewicht über und verweilt in diesem Ruhezustand, solange das Uhrwerk gehemmt ist; wird es ausgelöst, so setzt sich diese ruhende Energie allmählich in die Bewegungsenergie der sich drehenden Räder um. Aus den letzteren Beispielen erhellt zugleich, warum die ruhende Energie auch Spannungsenergie oder auch kurzweg Spannung genannt wird. Wird ein Stein lotrecht in die Höhe geworfen, so vermindert sich seine Ge-

schwindigkeit unter dem Einflufs der entgegenwirkenden Schwere; was er aber beim Emporsteigen an Bewegungsenergie einbüfst, gewinnt er an Energie der Lage, bis im höchsten Punkt seines Fluges, wo seine Geschwindigkeit erschöpft ist, seine ganze anfänglich vorhandene Bewegungsenergie in Energie der Lage verwandelt ist. Fällt er dann wieder herab, so beginnt er seinen Lauf mit diesem seiner anfänglichen Wucht gleichen Betrag von ruhender Energie, und während er immer tiefer fällt, wird seine Energie der Lage geringer und seine Bewegungsenergie gröfser, und zwar so, dafs die Summe beider immer die nämliche bleibt.[1]) In dem Augenblick endlich, in welchem er den Boden erreicht, hat sich seine gesamte Energie wieder in Bewegungsenergie verwandelt, welche ebenso grofs ist wie diejenige, mit welcher er anfänglich emporstieg. Die Gesamtenergie des geworfenen Steines, d. h. die Summe aus Bewegungsenergie und Spannungsenergie, bleibt also während seiner ganzen Bewegung unverändert, indem sich nur die eine Art Energie in die andere ohne Verlust und ohne Gewinn umwandelt. Was wird aber nun aus der Energie des Steines, wenn er den Boden trifft und hier plötzlich zur Ruhe kommt? Die Energie seiner sichtbaren Fallbewegung wird im Augenblick des Stofses allerdings vernichtet; wir beobachten aber, dafs, so oft Bewegungsenergie durch Stofs oder durch Reibung anscheinend zerstört wird, eine Erwärmung der beteiligten Körper eintritt; eine Kanonenkugel z. B., gegen eine eiserne Panzerplatte geschossen, erhitzt sich bis zum Rotglühen, und wird ein Eisenbahnzug durch Bremsen zum Stehen gebracht, so erwärmen sich Räder und Bremsen. Nun haben Joule und Hirn durch Versuche dargethan, dafs durch je 424 Arbeitseinheiten (Meterkilogramm), welche beim Stofs oder bei der Reibung scheinbar verschwinden, eine Wärmemenge erzeugt wird, welche imstande ist, 1 kg Wasser um 1° C. zu erwärmen, und dafs diese Wärmemenge (die Wärmeeinheit), wenn sie, z. B. in einer Dampfmaschine, verbraucht wird, wiederum eine Arbeit von 424 mkg leistet. Man nennt daher diese Zahl von 424 mkg das mechanische Äquivalent der Wärme. Diese Thatsache der Umwandlung von Arbeit in Wärme und umgekehrt wird sofort verständlich, wenn wir annehmen, dafs die Wärme eine Art Bewegung sei, nämlich eine Bewegung der kleinsten Teilchen oder Moleküle der Körper, welche wegen der aufserordentlichen Kleinheit dieser Teilchen zwar unserem Auge nicht sichtbar ist, dagegen auf unseren Gefühlssinn denjenigen Eindruck hervorbringt, welchen wir Wärme nennen. Wenn daher die Energie der sichtbaren Bewegung eines Körpers durch Stofs oder Reibung scheinbar zerstört wird, so verschwindet sie in der That nicht, sondern sie verwandelt sich blofs, ohne Verlust und ohne Gewinn, in die Energie der unsichtbaren Wärmebewegung. Energie kann niemals vernichtet und ebenso wenig kann Energie aus nichts erschaffen werden; ein

---

[1]) Denn aus den Gleichungen in (14) ergiebt sich $mgs + \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mc^2$, wo $mgs = ps$ die potentielle Energie ausdrückt.

sogenanntes perpetuum mobile, d. h. eine Vorrichtung, welche eine gröſsere Arbeit leistet als verbraucht, ist daher unmöglich. Alle Vorgänge in der Natur, bei welchen Energie zu verschwinden scheint, beruhen bloſs auf der Verwandlung der Energie einer Bewegungsart in die Energie einer anderen Bewegungsart oder auf der Verwandlung von Bewegungsenergie in Energie der Lage oder umgekehrt; hienach ist die gesamte im Weltall vorhandene Energiemenge stets von gleicher Gröſse. Dieses durch alle Erfahrungen bestätigte wichtige Grundgesetz aller Naturerscheinungen wird das Prinzip der Erhaltung der Energie (Robert Mayer 1842, Helmholtz 1847) oder auch, freilich weniger angemessen, das „Prinzip der Erhaltung der Kraft“ genannt. Indem dieses Gesetz die Umwandlung sämtlicher Energien der Natur (Schall, Wärme, Licht, Elektricität, chemische Verwandtschaft, Elasticität und mechanische Energie) ineinander beherrscht, so daſs sich dieselben nur als verschiedene Erscheinungsformen ein und derselben Wesenheit darstellen, führt es zu der Erkenntnis ihres innigen Zusammenhanges und berechtigt uns, in diesem Sinn von der Einheit der Naturkräfte zu sprechen.

20. **Zusammensetzung der Bewegungen. Parallelogramm der Kräfte.** Bei *A* (Fig. 6) am Ufer eines Flusses befinde sich ein Schiff, welches in einer gewissen Zeit von dem auf seine Segel wirkenden Wind von *A* nach *C* ans jenseitige Ufer getrieben und in der gleichen Zeit von der Strömung fluſsabwärts von *A* nach *B* geführt würde, wenn jede dieser Bewegungen allein stattfände. Wirken beide gleichzeitig, so wird die Strömung, unbekümmert um das Wehen des Windes (Unabhängigkeitsprinzip), das Schiff von der Linie *AC* weg, die es vermöge des Windes allein einhalten würde, um die Strecke *AB*, fluſsabwärts tragen bis zur Linie *BD*, welche durch den Punkt *B* parallel zu *AC* gezogen wurde. Gleichzeitig aber wird das Schiff durch den Wind von der Strecke *AB*, die es vermöge der Strömung allein einschlagen würde, in der Richtung, nach welcher der Wind weht, weggetrieben nach dem jenseitigen Ufer hin bis zur Linie *CD*, welche durch *C* parallel zu *AB* gezogen wird. Nach Ablauf jener Zeit muſs sich demnach das Schiff in dem Punkt *D* befinden, in welchem sich die Parallelen *BD* und *CD* treffen. Geben wir uns in derselben Weise Rechenschaft von dem Ort, welchen das Schiff in irgend einem zwischenliegenden Augenblick einnehmen wird, so finden wir, daſs es (wenn die beiden zusammenwirkenden Bewegungen von gleicher Art sind, z. B. beide gleichförmig oder beide gleichförmig beschleunigt) stets auf der Linie *AD* bleibt, oder daſs es die Diagonale *AD* des Parallelogramms *ABDC* durchläuft, welches durch die beiden Wege *AB* und *AC* und den von ihnen eingeschlossenen Winkel *BAC* bestimmt ist. Das Schiff bewegt sich also gerade so, als ob es auf strömungslosem Seespiegel von einem Wind von *A*

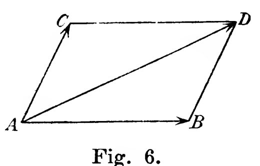


Fig. 6.
Parallelogramm der Kräfte.

nach $D$ getrieben würde, und dieser Wind vermöchte daher die beiden zusammenwirkenden Bewegungen vollkommen zu ersetzen. Da bei gleichartigen Bewegungen die Geschwindigkeiten, die Beschleunigungen und die Kräfte selbst in demselben Verhältnis stehen wie die in gleichen Zeiten zurückgelegten Wege, so kann man dasselbe Zeichnungsverfahren auch auf die Zusammensetzung dieser Gröfsen anwenden, wenn man sich die Kräfte ihrem Gröfsenverhältnis und ihrer Richtung nach durch gerade Linien dargestellt denkt. Man gelangt so zu dem Satz vom *Parallelogramm der Kräfte*: Zwei Kräfte (*Seitenkräfte* oder *Komponenten*), welche unter irgend einem Winkel an einem Punkt angreifen, können ersetzt werden durch eine Kraft, die *Mittelkraft* (*Resultante*), welche ihrer Gröfse und Richtung nach dargestellt wird durch die Diagonale des aus den Seitenkräften konstruirten Parallelogramms. Um mehrere auf einen Punkt wirkende Kräfte zu einer einzigen Mittelkraft zusammenzusetzen, braucht man nur dasselbe Verfahren zu wiederholen, indem man die dritte Kraft mit der Mittelkraft aus den beiden ersten, die vierte mit der Mittelkraft aus den drei ersten u. s. f. vereinigt (Kräftepolygon). Derselbe Satz lehrt ferner, eine gegebene Kraft ($AD$) in zwei Seitenkräfte ($AB$ und $AC$) zu *zerlegen*, welche zusammen dieselbe Wirkung hervorbringen wie jene allein; man braucht ja nur ein Parallelogramm zu zeichnen, welches die gegebene Kraft zur Diagonale hat. Da sich aber über einer gegebenen Diagonale unendlich viele verschiedene Parallelogramme konstruiren lassen, so ist diese Aufgabe unbestimmt, wenn nicht die Richtungen der beiden verlangten Seitenkräfte oder Richtung und Gröfse der einen gegeben sind.

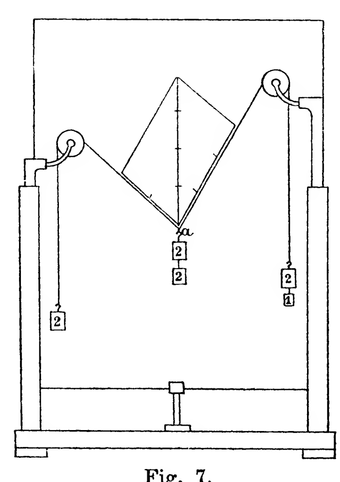


Fig. 7.
Parallelogramm der Kräfte.

Die von den Seitenkräften ($AB$ und $AC$) angestrebte Bewegung längs der Diagonale ($AD$) wird verhindert, oder es wird *Gleichgewicht* hergestellt, wenn man in $A$ eine Kraft wirken läfst, welche der Mittelkraft ($AD$) gleich und entgegengesetzt ist. Es ist alsdann jede der drei Kräfte entgegengesetzt der Resultirenden der beiden anderen. Ein solches Gleichgewicht dreier Kräfte stellt sich von selbst her an der Vorrichtung Fig. 7. An zwei vertikalen an einem Fufsbrett befestigten Stangen können zwei Rollen (um ihre Mittelpunkte drehbare am Rande ausgehöhlte Scheiben) verschoben und in beliebiger Höhe festgestellt werden. Über diese zwei Rollen ist eine Schnur geschlungen, auf der bei $a$ ein Ringelchen gleiten kann. Hängt man Gewichte an die Schnurenden und an das Ringelchen,

so ziehen in $a$ schief nach aufwärts die seitlichen Gewichte, und geben eine vertikal nach aufwärts gerichtete Mittelkraft, welche durch das vertikal nach abwärts ziehende mittlere Gewicht im Gleichgewicht gehalten wird. Hängt man z. B. links 3 Hektogramm (hg), rechts 4 und in der Mitte 5 hg an, so findet man durch Zeichnung eines Parallelogramms, dessen Seiten 3 und 4 und dessen Diagonale 5 ist, daſs die Seiten desselben einen rechten Winkel bilden müssen, und man sieht in der That, daſs die Schnurhälften in $a$ unter einem rechten Winkel zusammenstoſsen. Für andere Gewichtsverhältnisse (Fig. 7) ergeben sich andere Winkel, welche jedesmal mit den durch die Konstruktion gefundenen übereinstimmen, wovon man sich überzeugt, wenn man die entsprechende auf einem Karton ausgeführte Zeichnung mit vertikaler Diagonale hinter der Schnur aufstellt.

Der Ort eines Punktes kann übrigens immer durch die Konstruktion des Parallelogramms gefunden werden, auch wenn ungleichartige Bewegungen, z. B. eine gleichförmige und eine gleichförmig beschleunigte, zusammenwirken; nur wird er dann nicht die geradlinige Diagonale, sondern eine krummlinige Bahn von der Anfangslage bis zur Endlage durchlaufen, wie z. B. bei der Wurfbewegung. Gerade an der Wurfbewegung wurde das Unabhängigkeitsprinzip zuerst erkannt.

21. **Bewegung und Gleichgewicht auf schiefer Ebene.** Als Beispiel für die Anwendung des Satzes vom Kräfteparallelogramm betrachten wir zunächst das Verhalten eines schweren Körpers auf einer zum Horizont geneigten Ebene. Nehmen wir die Zeichnungsfläche senkrecht zu der Kante, welche die schiefe Ebene mit der Horizontalebene bildet, so stellt sich erstere als eine Gerade $AB$ dar, welche mit der Horizontalen $AC$ den Neigungswinkel $\alpha$ einschlieſst. Eine von irgend einem Punkte $B$ der schiefen Ebene auf die Horizontale herabgelassene Senkrechte $BC$, in dem rechtwinkligen Dreieck $ABC$ die dem Winkel $\alpha$ gegenüberliegende Kathete, heiſst die Höhe ($h$) der schiefen Ebene, die Hypotenuse $AB$ ihre Länge ($l$) und die dem Neigungswinkel anliegende horizontale Kathete $AC$ ihre Grundlinie oder Basis ($b$). Da Bewegung nur parallel zur schiefen Ebene eintreten kann, nicht aber senkrecht zu ihr, so zerlegen wir die in einem Punkte (dem Schwerpunkte) des Körpers vertikal abwärts wirkende Kraft $Q$, nämlich dessen Gewicht, in zwei zu einander senkrechte Seitenkräfte, von denen die eine, die Parallelkraft ($P$), zur Länge der schiefen Ebene parallel, die andere, die Normalkraft ($N$), senkrecht (oder normal) zu ihr steht. Jedes der beiden rechtwinkligen Dreiecke, in welche das Parallelogramm $NP$ durch seine Diagonale $Q$ zerschnitten wird, ist aber dem Dreieck $ABC$ oder $lhb$ ähnlich, und wir erhalten:

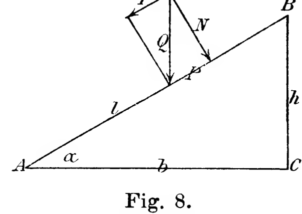


Fig. 8.
Schiefe Ebene.

$$P : Q = h : l \quad \text{und} \quad N : Q = b : l,$$

d. h. die Parallelkraft verhält sich zum Gewichte des Körpers wie die Höhe der schiefen Ebene zu ihrer Länge, die Normalkraft verhält sich zum Gewichte, wie die Basis zur Länge. Die beiden Seitenkräfte ergeben sich aus diesen Proportionen wie folgt:

$$P = Q \cdot \frac{h}{l} = Q \sin\alpha,$$

$$N = Q \cdot \frac{b}{l} = Q \cos\alpha,$$

jede derselben ist kleiner als das Gewicht des Körpers, weil in einem rechtwinkligen Dreieck jede Kathete kleiner ist als die Hypotenuse. Das Verhältnis der Höhe zur Länge heiſst die Steigung und wird gewöhnlich in Prozenten ausgedrückt.

Die Normalkraft $N$ drückt den schweren Körper gegen die schiefe Ebene und wird durch deren Gegendruck aufgehoben; sie übt daher, falls man von der Reibung absieht, indem man die Ebene sowohl als den Körper vollkommen glatt voraussetzt, auf die Bewegung keinen Einfluſs. Die Parallelkraft $P$ dagegen veranlaſst den Körper mit gleichförmig beschleunigter Bewegung längs der schiefen Ebene herabzugleiten, mit einer Beschleunigung $g'$, welche sich zu derjenigen des freien Falls $g$ verhält wie $P$ zu $Q$, also auch wie $h$ zu $l$, und demnach

$$g' = g \cdot \frac{h}{l} = g \sin\alpha$$

beträgt. Die Fallräume, welche während der Zeit $t$ längs der schiefen Ebene und im freien Fall durchlaufen werden, verhalten sich hiernach wie $g'$ zu $g$, oder wie $h$ zu $l$. Fällt man von $C$ (Fig. 9) die Senkrechte $CD$ auf $AB$, so wird $BD$ in derselben Zeit durchfallen, wie $BC$ (weil $BD:BC = h:l$). Beschreibt man über $BC$ als Durchmesser einen Kreis, so schneidet derselbe $AB$ in $D$, und man erkennt, daſs die Sehne $BD$, und dann auch die mit ihr parallele und gleiche Sehne $CD'$, in derselben Zeit durchlaufen wird, wie der Durchmesser $BC$; der vertikale Durchmesser eines Kreises wird also in derselben Zeit durchfallen, wie die von seinem oberen oder unteren Endpunkt auslaufenden Sehnen. Die Geschwindigkeit, welche der Körper erreicht, nachdem er durch die ganze Länge der schiefen Ebene herabgefallen ist, bestimmt sich aus der Gleichung $v^2 = 2g'l = 2g\frac{h}{l}l = 2gh$, ist also dieselbe, als wenn der Körper von der Höhe $g$ vertikal (mit der Beschleunigung $g$) herabgefallen wäre; denn die letztere Geschwindigkeit

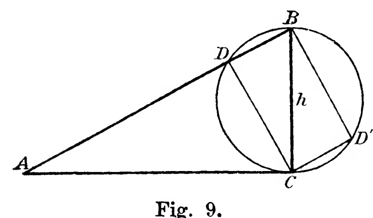


Fig. 9.
Fall durch die Sehne.

ergibt sich aus der nämlichen Gleichung $v^2 = 2gh$. Beim Herabfallen auf einer beliebigen schiefen Ebene erlangt ein Körper dieselbe Geschwindigkeit und demnach auch dieselbe Wucht, als wenn er bis zu derselben Tiefe vertikal herabgefallen wäre. Er mufs deshalb auch, wenn man seine Geschwindigkeit umkehrt, bis zu derselben vertikalen Höhe oder bis zu demselben Niveau steigen, gleichviel ob er vertikal oder längs einer beliebigen schiefen Ebene emporsteigt. Da die Zu- oder Abnahme an Wucht, welche ein fallender oder steigender Körper erlangt, nur von der durchlaufenden vertikalen Höhe abhängt, so gelten diese Sätze auch noch für das Fallen und Steigen auf beliebiger krummliniger Bahn.

Um das Herabgleiten des Gewichtes oder der Last $Q$ zu verhindern, braucht man nur eine Kraft parallel der schiefen Ebene nach aufwärts wirken zu lassen, welche der Parallelkraft $P$ gleich ist. Man kann auf diese Weise an einem verstellbaren Modell einer schiefen Ebene, welches Länge, Höhe, Basis und Neigungswinkel abzulesen gestattet, das Gesetz $P : Q = h : l$ durch Versuche bestätigen, indem man eine an der Last $Q$ befestigte Schnur parallel zur schiefen Ebene über eine an deren oberem Ende angebrachte Rolle gehen läfst; die Last wird dann im Gleichgewicht sein, wenn ein an das andere Ende der Schnur gehängtes Gewicht zu der Last in demselben Verhältnis steht, wie die Höhe zur Länge. Wird diese aufwärts wirkende Parallelkraft nur um weniges vergröfsert, so bewegt sich die Last nach aufwärts und wird demnach gehoben durch eine Kraft, die nur ein Bruchteil ist von derjenigen, welche zum senkrechten Emporheben erforderlich wäre. Man benutzt daher die schiefe Ebene zum Emporschaffen oder Herablassen von Lasten, zu deren senkrechter Hebung oder Hemmung nicht genügende Kraft zu Gebote steht, z. B. beim Beladen und Abladen von Wagen, als Laufbrücke bei Bauten und dgl. Bergstrafsen und -eisenbahnen sind nichts anderes, als schiefe Ebenen. Dabei kann aber an Arbeit nichts erspart werden, denn die Arbeit längs der schiefen Ebene ($Pl$) ist vermöge der obigen Proportion der Arbeit beim senkrechten Emporheben ($Qh$) stets gleich.

22. **Schraube.** Man kann ferner fragen, eine wie grofse Kraft $H$ (Fig. 10) parallel zur Basis einer schiefen Ebene notwendig ist, um einen Körper vom Gewichte $Q$ am Abwärtsgleiten zu verhindern. Wir zerlegen in diesem Falle die vertikale Kraft $Q$ in zwei Seitenkräfte, deren eine $H$ horizontal, die andere senkrecht zur schiefen Ebene gerichtet ist und durch deren Gegenwirkung aufgehoben wird. In dem hierzu gezeichneten Parallelogramm ist das rechtwinklige Dreieck $HQ$ demjenigen ähnlich, welches die schiefe Ebene darstellt, und wir finden:

$$H : Q = h : b,$$

d. h. die Horizontalkraft verhält sich zur Last, wie die Höhe der schiefen Ebene zur Basis, und daraus:

$$H = Q \cdot \frac{h}{b} = Q \operatorname{tang} \alpha.$$

Eine dieser Kraft gleiche aber entgegengesetzte Kraft müfste man an dem Körper wirken lassen, um seinem Bestreben, abwärts zu gleiten, das Gleichgewicht zu halten. Diese Art, die Kraft angreifen zu lassen, ist jedoch nur so lange vorteilhaft, als der Neigungswinkel $\alpha$ weniger als $45^0$ beträgt; bei stärkerer Neigung ist $h$ gröfser als $b$, und daher auch $H$ gröfser als $Q$.

Praktische Anwendung findet diese Art, eine Kraft wirken zu lassen, bei der Schraube, welche nichts anderes ist, als eine um einen Cylinder, die Schraubenspindel, gewundene schiefe Ebene, welche sich als ein beiderseits von Schraubenflächen begrenzter Vorsprung um die Spindel herumlegt; dieses „flache" oder „scharfe" Gewinde pafst genau in entsprechende vertiefte Windungen, welche in die Innenwand eines Hohlcylinders, der Schraubenmutter, eingeschnitten sind. Die Höhe eines Schraubengangs entspricht der Höhe, der Umfang der Spindel der Grundlinie der schiefen Ebene. Steht die Mutter fest und läfst man am Umfang der senkrecht stehenden Spindel eine wagrechte Kraft wirken, so wird die Spindel, je nach der Drehungsrichtung, hinauf- oder hinabsteigen, und im ersteren Fall (wie bei der Schraubenwinde) eine Last heben, im letzteren Fall (wie bei der Schraubenpresse) einen entsprechenden Druck ausüben; diese Last oder dieser Druck verhält sich zu jener Kraft wie der Umfang der Spindel zur Höhe eines Schraubengangs (wie die Grundlinie zur Höhe der schiefen Ebene).

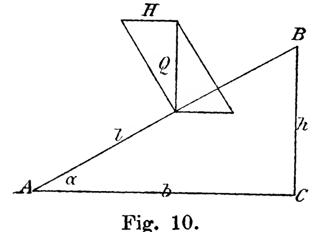


Fig. 10.
Schiefe Ebene (Schraube).

Bei diesen Schlüssen ist auf den (durch Schmiermittel zu vermindernden) Reibungswiderstand keine Rücksicht genommen, durch welchen die Schrauben mit grofser Kraft in ihren Muttern festgehalten und deshalb als Befestigungsschrauben und Klemmschrauben angewendet werden. Dreht man die Spindel um ihren ganzen Umfang, so rückt sie, wenn die Mutter feststeht, um die Höhe eines Schraubengangs fort; um ebensoviel rückt die bewegliche Mutter fort, wenn die Spindel festliegt; dreht man nur um einen Bruchteil eines Umgangs, so beträgt das Fortrücken einen ebenso grofsen Bruchteil des Schraubengangs. Darauf beruht der Gebrauch der Stellschrauben zur genauen Einstellung von Apparaten und Teilen derselben und die Anwendung der besonders sorgfältig geschnittenen Mikrometerschrauben zu feinen Messungen oder zur Herstellung der Einteilung von Mafsstäben und geteilten Kreisen (Teilmaschine). Das Sphärometer dient zur Messung der Dicke dünner Platten, und besteht aus einer Mikrometerschraube, welche sich in einer Mutter bewegt, die mit drei stählernen Fufsspitzen auf eine ebene Glasplatte gestellt wird. Die Schraube ohne Ende, eine Spindel von nur wenigen Gängen und ohne Mutter, dient zur Übertragung ihrer Bewegung auf ein Zahnrad, in dessen Zähne ihre Gänge ein-

greifen. Die am Umfang der Spindel wirkende **Kraft** übt auf den Umfang des Rades einen tangential gerichteten **Druck** aus, der sich zu jener Kraft verhält, wie der Umfang der Spindel zur Höhe des Schraubengangs.

23. **Zusammensetzung zweier Kräfte in einer Ebene an verschiedenen Punkten eines Körpers.** Zwei Kräfte $P$ und $Q$, welche an zwei verschiedenen Punkten $A$ und $B$ (Fig. 11) eines starren Körpers angreifen, können, wenn ihre Richtungen sich schneiden, nach dem Satze vom Parallelogramm zu einer Mittelkraft $R$ vereinigt werden. Man kann nämlich jede Kraft, ohne ihre Wirkung zu ändern, in ihrer eigenen Richtung verschieben, vorausgesetzt, dafs der neue Angriffspunkt mit dem früheren starr verbunden sei. Verlegt man demgemäfs jede der beiden Kräfte durch Verschiebung in ihrer eigenen Richtung an den Schnittpunkt $C$, so können sie dort durch die Mittelkraft $R$ ersetzt werden, falls $C$ mit $A$ und $B$ in starrer Verbindung ist. Die Resultante $R$ selbst kann wieder unbeschadet ihrer Wirkung an irgend einen in ihrer Richtung gelegenen Punkt ($M$) verschoben werden; die Konstruktion führt also auch dann zum Ziel, wenn der Schnittpunkt $C$ aufserhalb des Körpers läge, weil man dann irgend einen auf der Richtung der Resultante liegenden Punkt $M$ innerhalb des Körpers als Angriffspunkt wählen kann.

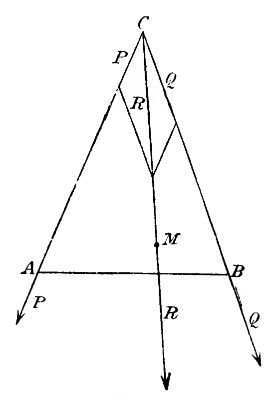


Fig. 11.
Kräfte an zwei Punkten.

24. **Keil.** Als Beispiel hierfür diene der Keil (Fig. 12), ein gleichschenklig dreiseitiges Prisma, das mit seiner scharfen Kante in einen zu spaltenden Körper eindringt, wenn auf die gegenüberliegende Fläche, den Rücken des Keils, eine genügende Kraft wirkt. Der Widerstand des zu spaltenden Körpers gegen das Eindringen des Keils äufsert sich dadurch, dafs senkrecht und symmetrisch zu dessen Seitenflächen zwei gleiche Kräfte $P$ wirken. Um diese zu einer Mittelkraft $R$ zu vereinigen, denken wir uns jede in ihrer Richtung verschoben und in dem Punkte angebracht, wo sich (auf der Mittellinie des gleichschenkligen Querschnitts des Keils) ihre verlängerten Richtungen treffen. Konstruiert man über den so verschobenen Kräften $P$ das Parallelogramm $a\,b\,c\,b'$, so stellt dessen Diagonale $a\,c$ die Kraft $R$ vor, mit welcher, wenn von der Reibung abgesehen wird, der Keil aus dem Körper gleichsam hinausgequetscht würde, wenn man ihr nicht durch eine gleiche in entgegengesetzter Richtung auf den Rücken des Keils wirkende Kraft das Gleichgewicht hielte.

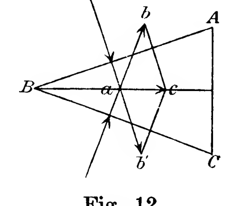


Fig. 12.
Keil.

Nun ist ersichtlich das Dreieck $abc$ dem Dreieck $ABC$, welches den Grundriſs des Keils darstellt, ähnlich, und es ergibt sich:

$$R : P = AC : AB,$$

d. h. die Kraft, welche senkrecht auf den Rücken des Keils wirkend denselben im Gleichgewicht hält, verhält sich zu dem Widerstand, den er erleidet, wie der Rücken des Keils zu seiner Seite. Je schmäler also der Rücken des Keils im Vergleich zur Seite ist, d. h. je schärfer der Keil zuläuft, desto geringere Kraft ist nötig, um ihn in den zu spaltenden Körper einzutreiben. Viele unserer schneidenden Werkzeuge, Messer, Beile, Hobel, Meiſsel u. s. w., sind nichts anderes als Keile.

25. **Parallele Kräfte.** Das oben (23) angegebene Verfahren der Zusammensetzung zweier an verschiedenen Punkten eines Körpers angreifenden Kräfte ist jedoch nicht ohne weiteres ausführbar, wenn die beiden Kräfte parallel sind. Wir betrachten daher diesen Fall besonders.

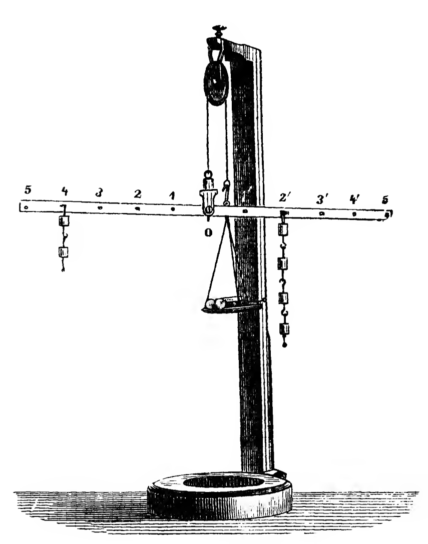



Fig. 13.
Parallele Kräfte.

Ein durchaus gleich dicker Metallstab (Fig. 13) sei um eine durch seinen Mittelpunkt gehende Achse leicht drehbar. Die sogenannte „Schere“ mit den Zapfenlagern (Körnern) hängt an einer Schnur, die über eine fest aufgehängte Rolle geht und andererseits eine Wagschale trägt. Legt man in diese ein Gewicht (Tara) gleich demjenigen des Stabes samt seiner Schere, so schwebt der Stab frei, gleichsam gewichtslos, sowohl in horizontaler, als beliebig geneigter Lage. Beiderseits vom Mittelpunkt 0 sind an dem Stabe in gleichen Abständen 1, 1′, 2, 2′, 3, 3′ u. s. w. Stifte angebracht zum Anhängen von kleinen Gewichten, die oben und unten mit Häkchen versehen sind. Hängt man an zwei gleich weit vom Mittelpunkt entfernte Stiftchen, etwa bei 5 und 5′, zwei gleiche Gewichte $p$ (etwa 20 g), so setzt sich der Stab zunächst nach abwärts in Bewegung, bleibt aber sofort stehen und schwebt im Gleichgewicht, wenn man zwei ganz gleiche Gewichte $p$ in die Wagschale legt. Da die jetzt an der Schnur nach aufwärts ziehende Kraft $2p$ der vereinten Wirkung der beiden bei 5 und 5′ abwärts ziehenden Kräfte (je $p$) das Gleichgewicht hält, so muſs diese Wirkung gleichwertig sein mit der einer einzigen im Mittelpunkt 0 abwärts ziehenden Kraft $2p$, und man

erkennt, dafs zwei gleiche parallele an zwei Punkten einer starren geraden Linie angreifende Kräfte durch eine zu ihnen parallele Mittelkraft ersetzt werden können, die gleich ist ihrer Summe und in der Mitte der Verbindungslinie ihrer Angriffspunkte wirkt. Nun hängen wir in den sechs Punkten 1, 1′, 3, 3′, 5, 5′ sechs gleiche Gewichte $p$ an den Stab; derselbe schwebt im Gleichgewicht, wenn wir ein Gewicht $= 6p$ auf die Wagschale zur Tara legen; denn man kann ja die in 1, 1′, 3, 3′, 5, 5′ wirkenden Kräfte $p$ paarweise in der gemeinschaftlichen Mitte 0 vereinigen, ohne ihre Wirkung zu ändern. Nun denken wir uns die sechs Gewichte $p$ in zwei ungleiche Gruppen geteilt, von denen die eine (3, 5) zwei, die andere (1, 1′, 3′, 5′) vier Gewichte umfafst. Nehmen wir die Gewichte bei 3 und 5 weg und hängen sie beide untereinander nach 4, also in die Mitte zwischen 3 und 5, so wird das Gleichgewicht nicht gestört, und ebenso können wir die Gewichte bei 1′, 3′ und bei 1, 5′ in ihrer gemeinschaftlichen Mitte 2′ vereinigen, ohne die noch immer im Punkte 0 wirkende Mittelkraft $6p$ zu ändern. Die Kraft $4p$ in der Entfernung 2 und die Kraft $2p$ in der Entfernung 4 von dem Punkte 0 geben also eine in letzterem Punkte angreifende zu ihnen parallele Mittelkraft $6p$. Es ändert sich an diesem Gleichgewicht nichts, wenn man den Stab aus der horizontalen in eine beliebige schiefe Lage bringt, es ist also gleichgiltig, ob die parallelen Kräfte senkrecht oder schief zur Verbindungslinie ihrer Angriffspunkte stehen. Wir können also sagen: Die Mittelkraft zweier gleichgerichteter paralleler Kräfte, welche an zwei fest verbundenen Punkten eines Körpers wirken, ist mit ihnen parallel und gleichgerichtet, ihrer Summe gleich, und greift in einem Punkte an, welcher die Verbindungslinie der Angriffspunkte im umgekehrten Verhältnis der anliegenden Seitenkräfte teilt. Die Lage dieses Punktes ist unabhängig von der Richtung der parallelen Kräfte.

Wir lassen jetzt vom Punkt 4′ eine Schnur nach aufwärts über eine fest aufgestellte Rolle gehen, und hängen an das andere Ende der Schnur das von 4 fortgenommene Gewicht $2p$; jetzt wirken an dem Stabe zwei entgegengesetzt gerichtete parallele Kräfte, die Kraft $4p$ in 2′ nach abwärts, die Kraft $2p$ in 4′ nach aufwärts. Gleichgewicht findet jetzt statt, wenn man zur Tara auf die Wagschale $4p - 2p = 2p$ legt, woraus hervorgeht, dafs die beiden gegebenen Kräfte zusammen ebenso wirken, wie eine im Punkte 0 nach abwärts ziehende Kraft $2p$. Es ergiebt sich also: Zwei entgegengesetzt parallele (antiparallele) ungleiche Kräfte können durch eine Mittelkraft ersetzt werden, welche ihrem Unterschiede gleich, mit der gröfseren gleichgerichtet ist, und an einem Punkte angreift, welcher auf der nach der Seite der gröfseren Kraft verlängerten Verbindungslinie der Angriffspunkte so liegt, dass sich seine Abstände von diesen Punkten umgekehrt verhalten wie die Seitenkräfte.

Umgekehrt läfst sich auch jede gegebene Kraft in zwei mit ihr parallele oder entgegengesetzt parallele Komponenten zerlegen, deren Summe oder Differenz ihr gleich ist, und deren Angriffspunkte nach Mafsgabe der beiden vorstehenden Sätze leicht zu bestimmen sind.

Diese Sätze lassen sich übrigens auch durch folgende Überlegungen, unter Anwendung des Satzes vom Parallelogramm, herleiten. An den Punkten $A$ und $B$ (Fig. 14) des Körpers, an welchen die zwei parallelen gleichgerichteten Kräfte $P$ und $Q$ angreifen, bringen wir zwei gleiche Kräfte, $p$ und $p$, an, welche sich in der Richtung der starren Verbindungslinie entgegenwirken; da sie sich aufheben, wird dadurch nichts geändert. Im Punkte $A$ geht aus $P$ und $p$ durch Konstruktion des Parallelogramms die Resultante $P'$, in $B$ die Resultante $Q$ hervor. $P'$ und $Q'$ verschieben wir nach dem Schnittpunkt $C$ ihrer Richtungen, zerlegen sie dort wieder in ihre ursprünglichen Komponenten, wobei $p$ und $p$ sich aufheben und nur noch $P$ und $Q$ übrig bleiben, welche, nach der gleichen Richtung wirkend, sich zu einer mit den gegebenen Kräften parallelen Mittelkraft $P+Q$ summieren.

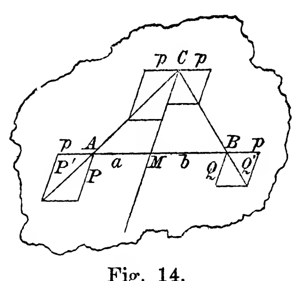


Fig. 14.
Parallele Kräfte

Diese Resultante kann man in ihrer Richtung verschieben und in einem beliebigen Punkte dieser Richtung, z. B. im Punkte $M$ auf $AB$ angreifen lassen. Aus der Ähnlichkeit der Dreiecke $AMC$ und $BMC$ mit den Dreiecken, welche die Hälften der entsprechenden Parallelogramme bilden, ergibt sich, wenn wir $MA$ mit $a$, $MB$ mit $b$ bezeichnen:

$$a : MC = p : P \text{ oder } Pa = p \,.\, MC,$$

$$b : MC = p : Q \text{ oder } Qb = p \,.\, MC,$$

also:

$$Pa = Qb \text{ oder } a : b = Q : P,$$

d. h. der erste obige Satz.

Greifen an zwei Punkten $A$ und $B$ (Fig. 15) eines Körpers zwei parallele ungleiche und entgegengesetzt gerichtete Kräfte an, so kann man die gröfsere derselben $P$ in zwei Seitenkräfte zerlegen, deren eine $Q_1$ der Kraft $Q$ gleich und entgegengesetzt mit ihr an demselben Punkte $B$ wirkt, und deren andere $R$, gleich dem Unterschied von $P$ und $Q$, an einem Punkte $M$ angreift, der auf der über $A$ hinaus verlängerten Verbindungslinie der Angriffspunkte $A$ und $B$ so liegt, dafs sich $MA$ zu $AB$ verhält wie $Q$ zu dem Unterschied von $P$ und $Q$, oder, was dasselbe ist, $MA$ zu $MB$ wie $Q$ zu $P$. Da die Kräfte $Q$ und $Q_1$ sich gegenseitig aufheben, so bleibt als Mittelkraft, welche die beiden Kräfte voll kommen ersetzt, nur noch die Kraft $R$ übrig, welche gleich dem Unterschied der gegebenen Kräfte ist und an einem Punkte der Verlängerung von $AB$ jenseits $A$ angreift, dessen Entfernungen von den Angriffspunkten $A$ und $B$ sich umgekehrt verhalten, wie die zugehörigen Kräfte.

Dies ist der zweite der obigen Sätze. Bezeichnen wir den gegebenen Abstand $AB$ mit $a$ und die Strecke $AM$ mit $x$, so mufs hienach

$$Px = Q(a + x) \text{ oder } x(P - Q) = aQ$$

sein, woraus sich ergibt:

$$x = a \,.\, \frac{Q}{P - Q}.$$

26. **Kräftepaar.** Läfst man die beiden entgegengesetzt parallelen Kräfte $P$ und $Q$ (Fig. 15) immer mehr und mehr einander gleich werden, so nähert sich ihr Unterschied $P - Q$ dem Werte Null und

der Angriffspunkt $M$ rückt immer weiter in die Ferne. Wird endlich $P = Q$, so ergibt sich an einem unendlich fernen Angriffspunkte eine Mittelkraft Null, d. h. es kann in diesem Falle eine Mittelkraft überhaupt nicht angegeben werden. Zwei gleiche entgegengesetzt parallele Kräfte haben demnach keine Mittelkraft: sie bilden ein „Kräftepaar“, das sich auf etwas Einfacheres nicht weiter zurückführen läſst. Es ist ersichtlich, daſs die Kräfte des Paares keine fortschreitende Bewegung, sondern nur Drehung des Körpers um eine Achse, welche auf der durch die beiden parallelen Kraftrichtungen gelegten Ebene (auf der Ebene der Zeichnung) senkrecht steht, bewirken können. Das von dem Kräftepaar hervorgerufene Drehungsbestreben ist offenbar um so gröſser, je gröſser jede der beiden Kräfte $P$ (Fig. 16) und je gröſser der senkrechte Abstand $a$ ihrer parallelen Richtungen ist. Das Produkt $Pa$ aus der einen Kraft und diesem Abstand, welcher als Arm des Kräftepaares bezeichnet wird, dient daher als Maſs für das Drehungsbestreben und wird das Moment des Kräftepaares genannt.

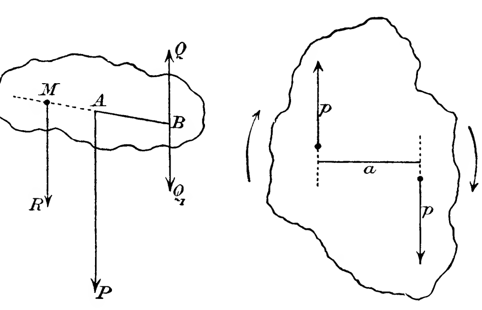


Fig. 15. Antiparallele Kräfte.

Fig. 16. Kräftepaar.

Ein Kräftepaar kann, ohne seine Wirkung zu ändern, in seiner Ebene beliebig verschoben und gedreht, oder in eine andere parallele Ebene, welche mit der ursprünglichen starr verbunden ist, verlegt und durch ein anderes von gleichem Drehungsbestreben oder Moment ersetzt werden. Durch die Lage seiner Ebene, seine Drehrichtung und sein Moment ist ein Kräftepaar völlig bestimmt. Eine auf der Ebene des Paares errichtete Senkrechte gibt die Lage dieser Ebene und auch die Drehungsrichtung an, wenn man sie nach der Seite hin zieht, von welcher aus gesehen die Drehung rechtläufig, d. i. im Sinne des Uhrzeigers, erfolgt. Gibt man ihr auch noch eine dem Momente des Paares proportionale Länge, so wird das Kräftepaar durch diese seine Achse nach Gröſse und Richtung anschaulich dargestellt. Kräftepaare, deren Ebenen parallel sind und deren Achsen demnach zusammenfallen, können durch ein einziges ersetzt werden, dessen Moment (oder Achse) gleich ist der Summe der Momente (der Achsen) der komponirenden Kräftepaare, wobei die nach der einen Richtung drehenden Momente positiv, die nach der entgegengesetzten Richtung drehenden negativ zu zählen sind, gerade so, wie Kräfte, die in derselben Geraden an einem Punkte wirken, durch bloſse Addition zusammengesetzt werden. Auch zwei Kräftepaare, deren Ebenen und demnach auch ihre Achsen einen Winkel miteinander bilden, werden nach derselben Regel zusammen-

gesetzt, wie zwei Kräfte; die Achse (das Moment) des resultirenden Paares ist nämlich der Gröfse und Richtung nach die Diagonale des Parallelogramms, das die Achsen (Momente) der gegebenen Paare zu Seiten hat, und ebenso kann auch jedes Kräftepaar oder Drehungsmoment in zwei Komponenten zerlegt werden.

27. **Zusammensetzung beliebiger Kräfte, die an verschiedenen Punkten eines starren Körpers angreifen.** An einem beliebig gewählten Punkte $O$ (Fig. 17) des Körpers werde eine Kraft angebracht, welche einer der gegebenen Kräfte parallel und gleich ist, und eine ihr gleiche und entgegengerichtete Kraft. Da die beiden letzteren an dem Punkte $O$ wirkenden Kräfte sich aufheben, so ändern sie nichts an dem Zustande des Körpers. Diese entgegengerichtete Kraft bildet aber mit der gegebenen ein Kräftepaar. Es kann demnach jede Kraft $P$ ersetzt werden durch eine gleiche parallele Kraft an irgend einem mit ihrem Angriffspunkte $A$ starr verbundenen Punkte $O$, und durch ein Kräftepaar, das durch eine der letzteren gleiche und entgegengesetzte und durch die gegebene Kraft gebildet wird. Verfährt man ebenso mit den anderen an beliebigen Punkten des Körpers wirkenden Kräften unter Beibehaltung desselben Punktes $O$, so hat man schliefslich die sämtlichen Kräfte jede parallel mit sich selbst an einen und denselben Punkt $O$ verlegt, und aufserdem noch ebensoviele Kräftepaare, als Kräfte gegeben waren. Die Kräfte an $O$ einerseits und die Achsen der Paare andererseits können nun nach der Regel des Parallelogramms zusammengesetzt werden, und es erscheinen hiermit die an dem Körper in verschiedenen Punkten und in beliebigen Richtungen angreifenden Kräfte auf eine einzige Kraft und ein einziges Kräftepaar zurückgeführt, welche im allgemeinen eine fortschreitende und zugleich eine drehende Bewegung des Körpers hervorbringen.

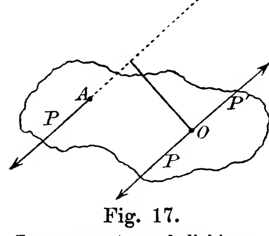


Fig. 17.
Zusammensetzung beliebig gegebener Kräfte.

28. **Mittelpunkt der parallelen Kräfte. Schwerpunkt.** Durch wiederholte Anwendung der obigen Sätze von der Zusammensetzung paralleler Kräfte lassen sich beliebig viele parallele Kräfte von gleicher Richtung zu einer einzigen Mittelkraft zusammenfassen, indem man die Mittelkraft der beiden ersten Kräfte mit der dritten, die neue Mittelkraft mit der vierten etc. vereinigt; man findet so schliefslich eine Gesamtmittelkraft, welche gleich der Summe aller gegebenen Kräfte ist und an einem bestimmten Punkte, dem Mittelpunkt (Centrum) der parallelen Kräfte, angreift, dessen Lage von der Richtung der Kräfte unabhängig ist. Den Angriffspunkt der Mittelkraft aus allen an den verschiedenen Teilchen eines schweren Körpers angreifenden Schwerkräften nennt man seinen Schwerpunkt (Massenmittelpunkt). Da diese Kräfte lotrecht gerichtet und sonach unter sich parallel sind, so ist ihre Mittelkraft gleich ihrer Summe, d. h.

gleich dem Gesamtgewicht des Körpers und der Schwerpunkt ist der Mittelpunkt der parallelen Schwerkräfte, in welchem das ganze Gewicht des Körpers vereinigt gedacht werden kann, und welcher unterstützt sein muſs, wenn der Körper der Schwere gegenüber sein Gleichgewicht behaupten soll. Ein aufgehängter Körper z. B. befindet sich im Gleichgewicht, wenn der Schwerpunkt lotrecht unter dem Aufhängungspunkte liegt. Darauf gründet sich ein Verfahren, den Schwerpunkt eines Körpers durch Versuche zu finden. Hängt man nämlich einen Körper mittels eines an einem Punkt *a* seines Umfanges befestigten Fadens auf (Fig. 18), so muſs die Verlängerung *a c* des Fadens durch den Schwerpunkt gehen und stellt somit eine Schwerlinie (so nennt man jede durch den Schwerpunkt gezogene gerade Linie) des Körpers dar; hängt man ferner den Körper an einem zweiten seiner Punkte *b* (Fig. 19) auf, so muſs der Schwerpunkt abermals in der Verlängerung des Fadens, nämlich auf

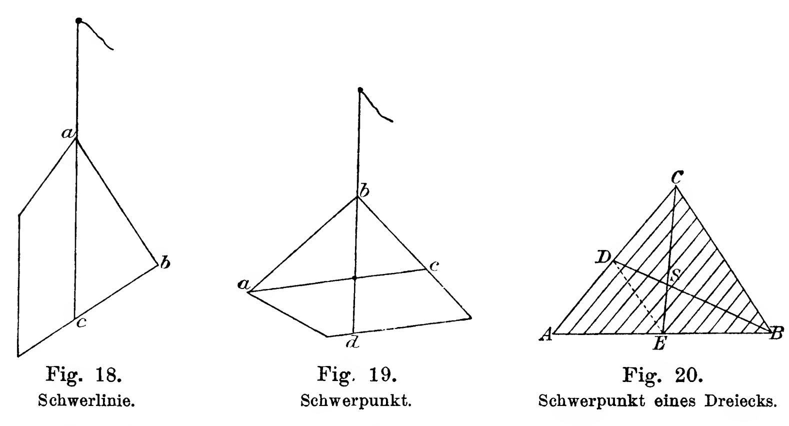



Fig. 18. Schwerlinie.

Fig. 19. Schwerpunkt.

Fig. 20. Schwerpunkt eines Dreiecks.

der Schwerlinie *b d* liegen; er liegt sonach im Durchschnittspunkt der Linien *a c* und *b d*. Bei Körpern von gleichartiger Masse und geometrisch bestimmter Gestalt läſst sich der Schwerpunkt häufig durch einfache Überlegungen auffinden. Der Mittelpunkt einer Kugel oder eines Ellipsoids ist offenbar zugleich Schwerpunkt; bei einer Walze mit parallelen Endflächen liegt der Schwerpunkt in der Mitte der Achse, bei einem Parallelepiped im Durchschnittspunkt der Diagonalen. Der Schwerpunkt einer dreieckigen Fläche liegt auf der von einer Ecke nach der Mitte der Gegenseite gezogenen Geraden, um ein Drittel derselben von dieser Seite entfernt; derjenige einer Pyramide oder eines Kegels auf der von der Spitze nach dem Schwerpunkt der Grundfläche gezogenen Linie um $^1/_4$ derselben von der Grundfläche entfernt. Der Schwerpunkt eines Körpers liegt übrigens nicht immer innerhalb seiner Masse; bei einer Hohlkugel, Schale, Flasche z. B. liegt er in deren Hohlraum.

Denkt man sich ein (etwa aus Blech geschnittenes) Dreieck *ABC* (Fig. 20) parallel einer Seite *AC* in sehr schmale Streifchen zerschnitten, so

liegen deren Schwerpunkte in ihrer Mitte; folglich liegt der Schwerpunkt des ganzen Dreiecks auf der von der Gegenecke $B$ nach der Mitte $D$ von $AC$ gezogenen Linie $BD$, weil diese auch sämtliche Streifchen halbirt, oder die „Transversale“ $BD$ ist eine Schwerlinie des Dreiecks; dann ist aber auch die Transversale $CE$ eine Schwerlinie und der Schwerpunkt $S$ liegt im Durchschnittspunkte beider, durch welchen notwendig auch die dritte Transversale geht. Zieht man $DE$, so ist Dreieck $DSE$ ähnlich mit Dreieck $BSC$, und man hat

$$DS : BS = ES : CS = DE : BC = 1 : 2$$

(da ja $DE = {}^1/_2 BC$ ist), also auch $DS = {}^1/_2 BS$, $ES = {}^1/_2 CS$ oder $DS = {}^1/_3 BD$, $ES = {}^1/_3 CE$.

Auch durch Rechnung läfst sich die Lage des Schwerpunktes finden. Sind z. B. (Fig. 21) längs einer starren geraden Linie beliebig viele Massenpunkte $m, m', m'', \ldots$ in den Entfernungen $r, r', r'', \ldots$ von irgend einem Punkte $A$ der Geraden angebracht, so mufs in Beziehung auf diesen Punkt das Moment der Gesamtmasse ($M = m + m' + m'' + \ldots = \Sigma m$), welche in dem um $s$ von $A$ entfernten Schwerpunkt $S$ vereinigt gedacht werden kann, gleich sein der Summe der Momente der Einzelmassen $mr + m'r' + m''r'' + \ldots = \Sigma mr$; man hat also $Ms = \Sigma mr$, folglich

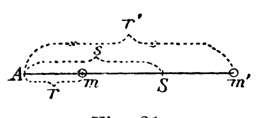


Fig. 21.
Berechnung des Schwerpunktes.

$$s = \frac{\Sigma mr}{M} = \frac{\Sigma mr}{\Sigma m}.$$

Sind z. B. blofs zwei Massen $m$ und $m'$ in den Entfernungen $r$ und $r'$ gegeben, so ist

$$s = \frac{mr + m'r'}{m + m'}.$$

29. **Hebel.** Ein starrer Körper, an dessen Punkten $A$ und $B$ (Fig. 23) zwei in derselben Ebene (Ebene der Zeichnung) liegende Kräfte $P$ und $Q$ angreifen, sei um eine zu dieser Ebene (in $M$) senkrechte feste Achse drehbar. Der Körper kann alsdann keine fortschreitende, sondern nur eine drehende Bewegung um diese Achse annehmen. Auch diese kann nicht eintreten, und der Körper befindet sich auch gegen Drehung im Gleichgewicht, wenn die (in bekannter Weise [23] zu konstruirende) Resultante $R$ durch einen Punkt $M$ der festen Achse hindurchgeht. Verbindet man den Punkt $M$ mit den Ecken $D$ und $E$ des zur Auffindung der Mittelkraft $R$ gezeichneten Parallelogramms $CDFE$, und fällt von $M$ aus die Senkrechten $a$ und $b$ auf die Richtungen der Seitenkräfte $P$ und $Q$, so sind die auf gemeinschaftlicher Grundlinie $MC$ mit gleichen Höhen $h$ stehenden Dreiecke $MDC$ und $MEC$ flächengleich. Die doppelten Flächen dieser Dreiecke werden aber auch ausgedrückt durch die Produkte $Pa$ und $Qb$. Es mufs also, wenn die Resultante durch die feste Achse geht und demnach keine Drehung stattfindet, $Pa = Qb$ sein. Das Produkt

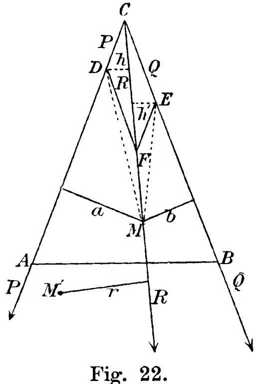


Fig. 22.
Moment.

einer Kraft mit der von einem Punkt auf ihre Richtung gefällten Senkrechten heifst das (statische) Moment der Kraft in Beziehung auf diesen Punkt; es drückt das von der Kraft ausgeübte Drehungsbestreben aus und ist gleichbedeutend mit dem Momente des Kräftepaars, welches übrig bleibt, wenn man die Kraft nebst einer ihr gleichen und entgegengesetzten (nach 27) an den festen ihr widerstehenden Punkt der Achse verlegt. Der Körper befindet sich demnach im Gleichgewicht, wenn die Momente der beiden Kräfte einander gleich ($Pa = Qb$) sind, oder wenn das Moment des resultirenden Kräftepaars $Pa - Qb = 0$ ist. Ginge die Achse durch einen andern Punkt $M'$ in der Entfernung $r$ seitwärts von der Mittelkraft $R$, so würde Drehung um $M'$ mit dem Momente $Rr$ eintreten.

Einen jeden um eine feste Achse drehbaren Körper, an welchem in Ebenen senkrecht zur Achse Kräfte wirken, nennt man einen Hebel, und bezeichnet als Hebelarm jeder Kraft ihren senkrechten Abstand von der Drehungsachse. Der Hebel ist im Gleichgewicht, wenn die Summe der Produkte aller Kräfte mit ihren Hebelarmen oder

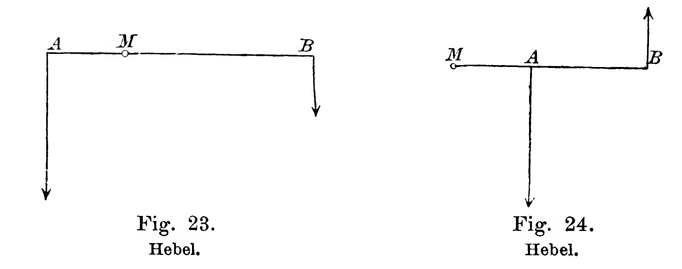



Fig. 23. Hebel.

Fig. 24. Hebel.

die Summe aller Momente Null ist, wobei man die Kräfte, die nach der einen Seite drehen, positiv, diejenigen, welche nach der entgegengesetzten Seite drehen, negativ zu rechnen hat. Denn führt man nach 27 die gegebenen Kräfte auf eine einzige in einem Punkte der Achse angreifende Mittelkraft und auf ein einziges Kräftepaar zurück, so wird erstere durch den Widerstand der festen Achse aufgehoben, und letzteres bringt keine Drehung hervor, wenn sein Moment, d. i. in diesem Falle die Summe der Momente aller einzelnen Kräftepaare, Null ist.

Die einfachste Form des Hebels würde eine gerade, unbiegsame, schwerlose, um einen ihrer Punkte (Stützpunkt, Hypomochlion) drehbare Linie sein, an deren Enden parallele, gleichgerichtete Kräfte (z. B. angehängte Gewichte) senkrecht angreifen (Fig. 23). Da bei diesem Hebel die beiden Teile der Stange ($MA$ und $MB$) vom Drehpunkt bis zu dem Angriffspunkt der Kräfte die Hebelarme sind und als solche unmittelbar ins Auge fallen, so hat man ihn den zweiarmigen Hebel genannt. Er befindet sich im Gleichgewicht, wenn die Produkte aus Kraft und Hebelarm beiderseits einander gleich sind, oder, was dasselbe ist, wenn die Kräfte im umgekehrten Verhältnis ihrer Hebelarme stehen. Ein gleicharmiger Hebel ist im

Gleichgewicht, wenn die beiden an seinen Enden wirkenden Kräfte einander gleich sind (Wage).

Wenn die beiden auf eine um einen Punkt drehbare Stange wirkenden Kräfte entgegengesetzte Richtungen haben, so müssen sie, um entgegengesetzte Drehungsbestrebungen wachzurufen, auf der nämlichen Seite des Drehungspunktes wirken (Fig. 24); wie im vorigen Fall, halten sie sich das Gleichgewicht, wenn sie sich umgekehrt verhalten wie die Entfernungen ihrer Angriffspunkte vom Drehpunkt. Obgleich also auch hier jeder Kraft ein Hebelarm ($MA$ und $MB$) entspricht, hat man doch, weil nur der längere Hebelarm (als Länge der um ihren Endpunkt drehbaren Stange) sich der Wahrnehmung selbständig aufdrängt, während der kürzere nur einen Teil desselben ausmacht, diesen Hebel als einarmigen bezeichnet.

Der experimentelle Nachweis für diese Hebelgesetze ist durch die obigen Versuche mit dem um seine Mitte drehbaren Metallstab (Fig. 13) bereits gegeben. Denn man braucht ja nur die Schere, welche die Drehungsachse hält, festzustellen, um ihn in einen Hebel zu verwandeln, dessen feste Achse die Mittelkraft, und zugleich, weil sie durch den Schwerpunkt des Stabes geht, sein Gewicht aufnimmt und ihn dadurch gleichsam gewichtslos macht. Liegt der Schwerpunkt eines Hebels aufserhalb der Achse, so mufs sein Gewicht als eine weitere vertikal abwärts wirkende, in diesem Punkte angreifende Kraft berücksichtigt werden.

Vermittelst des Hebels kann eine grofse Last durch eine kleine Kraft im Gleichgewicht gehalten und, bei geringer Vermehrung der Kraft gehoben werden, wenn man den Hebelarm der Kraft so viel mal länger nimmt als denjenigen der Last, wie diese gröfser ist als die Kraft. Ein einfaches Beispiel bietet das Hebeeisen; um einen schweren Steinblock von der Stelle zu rücken, schiebt der Arbeiter das eine Ende der eisernen Stange unter den Block, legt nahe diesem Ende als Stützpunkt einen Stein unter und lüpft nun, indem er mit seiner Muskelkraft den langen Arm des so geschaffenen Hebels niederdrückt, den auf dem kurzen Hebelarm lastenden Steinblock. Eine bekannte Anwendung des einarmigen Hebels ist z. B. der Schiebkarren; der Drehpunkt ist die Achse des Rades, die an den Griffen aufwärts ziehende Muskelkraft des Kärrners hält die auf den Karren geladene, in kleinerer Entfernung vom Drehpunkt abwärts ziehende Last in der Schwebe und vermag sie nun mit Hilfe des Rades (welches übrigens auf die Hebelwirkung keinen Einflufs übt) fortzubewegen.

Hebel von den verschiedensten Formen finden im täglichen Leben häufige Anwendung; die eiserne Klinke z. B., an welcher die Drähte eines Klingelzuges befestigt sind, und welche dazu dient, den lotrechten Zug der Hand in einen wagrechten Zug an der Glocke umzusetzen, ist nichts anderes als ein Winkelhebel, dessen Hebelarme einen rechten Winkel miteinander bilden. Jeder Schlüssel ist ein um seine Längsachse drehbarer Hebel; der Bart stellt den einen, der Griff

den anderen Hebelarm dar. Scheren, Zangen, Nufsknacker sind Verbindungen von je zwei Hebeln etc.

Auch das Rad an der Welle (Wellrad) ist nichts anderes als ein Hebel, gebildet aus einer um ihre Achse drehbaren Walze (Welle), auf welche eine kreisförmige Scheibe von gröfserem Durchmesser (das Rad) aufgesetzt ist. Eine Last, welche an einem um die Welle gewundenen Seil hängt, wird durch eine am Umfang des Rades wirkende Kraft im Gleichgewicht gehalten, wenn sich die Kraft zur Last verhält wie der Halbmesser der Welle zum Halbmesser des Rades. Das Rad kann auch durch einzelne Speichen oder durch eine Kurbel ersetzt werden.

Eine Reihe von Hebeln, welche mit ihren Enden aufeinander wirken, heifst ein zusammengesetzter Hebel; er befindet sich im Gleichgewicht, wenn die Kraft am Ende des letzten Hebels zur Kraft am Anfang des ersten sich verhält wie das Produkt aller diesem Anfang zugewendeten Hebelarme zu dem Produkt aller jenem Ende zugekehrten. Räderwerke mit ineinandergreifenden Zahnrädern sind zusammengesetzte Hebel, deren Hebelarme durch die Halbmesser der Räder vorgestellt werden.

An einem um eine Achse drehbaren Körper kann, ohne dafs an seinem Zustande etwas geändert wird, jede Kraft durch eine andere mit gleichem Drehungsbestreben ersetzt werden; man braucht die neue Kraft nur so zu wählen, dafs sie zu der gegebenen sich verhält wie deren Hebelarm zu dem neuen Hebelarm.

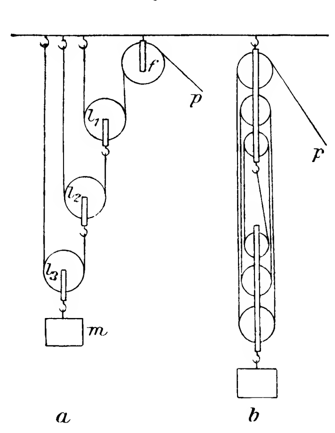


Fig. 25.
Flaschenzüge.

30. **Rolle. Flaschenzüge.** Eine besondere Art von Hebel ist auch die Rolle, eine kreisförmige Scheibe, die sich um eine durch ihren Mittelpunkt gehende, in einem Gehäuse (Kloben oder Schere) gelagerte Achse dreht, und deren Umfang zur Aufnahme eines Seiles mit einer Rinne (Schnurlauf) versehen ist. Man nennt die Rolle fest, wenn ihre Schere an einem festen Punkt aufgehängt ist, so dafs ihr Mittelpunkt keine fortschreitende Bewegung annehmen kann (Fig. 25a, *f*). Sie ist im Gleichgewicht, wenn an den Enden des um sie gelegten Seiles gleiche Kräfte angreifen, weil alsdann die durch diese Kräfte hervorgerufenen entgegengesetzten Drehungsbestrebungen (die Momente) einander gleich sind, und ihre Mittelkraft sich als Druck gegen die festgehaltene Achse erschöpft. Die feste Rolle gewährt daher bei Bewältigung einer Last keine Erleichterung, sondern sie dient als Leit- oder Richtungsrolle nur dazu, die Richtung verfügbarer Kräfte nach Belieben abzuändern; man benutzt

sie z. B., um die abwärts ziehende Kraft eines an das eine Seilende angehängten Gewichts in einen gleichgrofsen aufwärts gerichteten Zug des anderen Seilendes umzusetzen, oder um durch die wagrechte Zugkraft eines Pferdes eine Last senkrecht emporzuheben. Eine Rolle mit freier Schere, deren Mittelpunkt sonach beweglich ist, heifst eine lose Rolle; man erhält eine solche, wenn man das eine Ende des Seiles an einem festen Punkt anknüpft, an der Schere eine Last aufhängt und an dem anderen Seilende eine Kraft wirken läfst (z. B. Fig. 25 a, $l_1$). Die beiden Seilenden müssen, wenn die Rolle sich nicht drehen soll, mit gleichen Kräften gespannt sein, deren Mittelkraft, durch den Drehpunkt der Rolle gehend, der Last das Gleichgewicht hält. Sind z. B. die Seilenden parallel und lotrecht, so hat jedes derselben die Hälfte der Last zu tragen; da aber der feste Punkt den auf das befestigte Seilende ausgeübten Zug aufnimmt, so braucht man an dem freien Seilende nur noch eine Kraft gleich der Hälfte der Last wirken zu lassen, um dieser das Gleichgewicht zu halten. Durch die lose Rolle wird also die Last gleichsam halbirt. Wird an der Schere der losen Rolle nicht die Last, sondern das freie Seilende einer zweiten losen Rolle ($l_2$), an der Schere dieser das freie Seilende einer dritten losen Rolle ($l_3$) u. s. f. und die Last schliefslich an der Schere der letzten losen Rolle befestigt, so wird die Last durch jede lose Rolle von neuem halbirt; sind $n$ lose Rollen vorhanden, so ist der Zug $p$ der Last $m$ am letzten Seilende nur noch $m/2^n$. Durch eine solche Vorrichtung, welche man Rollenzug oder der obigen Gröfsenbeziehung wegen Potenzflaschenzug nennt, kann man also mit einer kleinen, an dem ersten freien Seilende wirkenden Kraft eine grofse, an der Schere der letzten losen Rolle hängende Last im Gleichgewicht halten und sie durch geringe Vermehrung der Kraft emporheben. Zu demselben Zweck dient der Flaschenzug (Fig. 25 b), den man erhält, wenn man eine feste und eine lose Flasche (so nennt man eine Vereinigung mehrerer Rollen in gemeinschaftlicher Schere) derart miteinander verbindet, dafs das an der Schere der festen Flasche befestigte Seil abwechselnd um eine Rolle der losen und der festen Flasche geht; da sich die an der Schere der losen Flasche hängende Last auf doppelt so viel Seilstrecken verteilt, als in der Flasche Rollen vorhanden sind, so hat man das von der festen Flasche herabhängende Seilende, um die Last in der Schwebe zu halten, mit einer Kraft $p$ zu spannen, welche der sovielte Teil der Last ist, als Rollen in beiden Flaschen zusammen vorhanden sind; hat also jede Flasche $n$ Rollen, so ist der Zug der Last am letzten Seilende $m/2n$.

31. **Maschinen** sind Vorrichtungen, welche verfügbare Kräfte in zweckentsprechender Weise übertragen. Einfache Maschinen, auf welche sich die Teile aller zusammengesetzten Maschinen zurückführen lassen, sind der Hebel in seinen verschiedenen Formen (Rolle, Rad an der Welle) und die schiefe Ebene nebst ihren Abarten (Schraube, Keil). Durch eine Maschine kann niemals Arbeit erspart, sondern nur in unveränderter Gröfse übertragen werden; die Arbeit,

welche von der bewegenden Kraft verausgabt wird, ist stets gleich der Arbeit, die von der Last oder dem zu überwindenden Widerstand aufgezehrt wird, wie für die schiefe Ebene früher bereits nachgewiesen wurde. Ein Hebel (Fig. 26) ist im Gleichgewicht, wenn die Produkte aus Kraft und Hebelarm beiderseits gleich sind. Wird nun, indem man den Hebel aus der wagrechten Gleichgewichtslage $AMB$ in die schiefe Lage $A'MB'$ übergehen läſst, die gröſsere Last durch die kleinere Kraft gehoben, so ist die Arbeit, welche die Kraft leistet, gleich dem Produkt aus der Kraft $P$ und der Strecke $bB' = \delta$, um welche sich ihr Angriffspunkt gesenkt hat, und ebenso die Arbeit, welche die Last zu ihrer Hebung beansprucht, gleich dem Produkt aus der Last $Q$ und der Strecke $aA' = \delta'$. Da nun die Strecken $aA'$ und $bB'$ augenscheinlich in demselben Verhältnis zu einander stehen wie die zugehörigen Hebelarme $MA'$ und $MB'$, so muſs auch $P\delta = Q\delta'$ sein, d. h. die Arbeit der Last ist gleich der Arbeit der Kraft.

Wird eine Last $Q$ mittels eines Flaschenzuges durch eine z. B. sechsmal geringere Kraft $P$ gehoben, so steigt die Last um eine sechsmal kleinere Strecke empor, als der Angriffspunkt der Kraft herabgeht, und die beiderseits geleisteten Arbeiten sind wiederum einander gleich, d. h. es ist $P\delta = Q\delta'$, wenn man mit $\delta$ und $\delta'$ die Verschiebungen bezeichnet, welche die Angriffspunkte der Kräfte $P$ und $Q$ bei eintretender Bewegung gleichzeitig in der Richtung der Kräfte erleiden. Man hat diesen allgemein giltigen Satz auch in folgender Form als „goldene Regel der Mechanik“ ausgesprochen: Was an Kraft gewonnen wird, geht an Weg verloren.

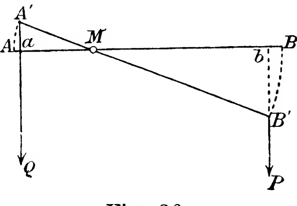


Fig. 26.
Hebel.

Statt $P\delta = Q\delta'$ kann man auch schreiben $P\delta - Q\delta' = 0$, oder $P\delta + Q\delta' = 0$, wenn man eine Verschiebung des Angriffspunktes im Sinne der wirkenden Kraft positiv, eine Verschiebung im entgegengesetzten Sinne negativ rechnet. Befindet sich also eine Maschine im Gleichgewicht, und es tritt eine kleine für die Konstruktion der Maschine mögliche (virtuelle) Verschiebung der Angriffspunkte ein, so ist die Summe der bewegenden (positiven) Arbeit und der widerstehenden (negativen) Arbeit gleich Null. Es gilt dies aber nicht bloſs für die einfachen Maschinen und für nur zwei Kräfte, sondern auch für beliebig viele Kräfte, die an irgendwie miteinander verbundenen Punkten (an einer beliebigen Maschine) angreifen. Wir gelangen also zu dem folgenden allgemein giltigen Prinzip der virtuellen Arbeiten (Prinzip der virtuellen Momente oder der virtuellen Geschwindigkeiten): Befindet sich eine Verbindung materieller Punkte, an welchen Kräfte angreifen, im Gleichgewicht, so ist die Summe der virtuellen Arbeiten dieser Kräfte gleich Null für alle kleinen bei der vorhandenen Verbindung

möglichen (virtuellen) Verschiebungen der Angriffspunkte, oder es ist, wenn $P, P', P''$ ... die Kräfte, $\delta, \delta', \delta''$ ... die nach den Richtungen der zugehörigen Kräfte gemessenen Verschiebungen darstellen:

$$P\delta + P'\delta' + P''\delta'' + \ldots = 0.$$

Als Beispiel betrachten wir den Differentialflaschenzug (Fig. 27). Um zwei auf derselben Achse miteinander fest verbundene Rollen mit den wenig verschiedenen Radien $R$ und $r$ und eine lose Rolle, an der die Last $P'$ hängt, sei eine in sich zürücklaufende Schnur oder Kette, gegen Gleitung gesichert, in der durch Fig. 27 angedeuteten Weise geschlungen. Zieht man die Schnur in der Richtung des Pfeils mit der Kraft $P$ um das Stückchen $\delta$ fort, so wird der Schnurteil $a$ um das Stückchen $\delta$ auf die Rolle $R$ aufgewickelt, der Schnurteil $b$ um $\delta \cdot r / R$ abgewickelt, und die Last $P'$ steigt um $\delta' = {}^1/_2\, \delta \left(1 - \frac{r}{R}\right)$. Damit Gleichgewicht bestehe, mufs $P\delta - P'\delta' = 0$, also, da die willkürliche Verschiebung $\delta$ sich weghebt,

$$P = {}^1/_2\, P' \left(1 - \frac{r}{R}\right)$$

sein.

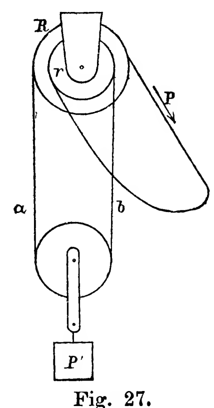


Fig. 27.
Differentialflaschenzug.

32. **Formen des Gleichgewichts. Standfestigkeit.** Ein Körper, welcher um eine wagrechte feste Achse drehbar ist, befindet sich der Schwerkraft gegenüber in jeder beliebigen Lage im Gleichgewicht, wenn sein Schwerpunkt genau in der Drehungsachse liegt: man sagt alsdann, er befinde sich im „gleichgiltigen" oder indifferenten Gleichgewicht. Liegt sein Schwerpunkt lotrecht über der Achse, so wird der Körper, sobald man ihn aus dieser Gleichgewichtslage nur ein wenig herausdreht, von der Schwere nach der Seite weiter gedreht, nach welcher er sich neigt; man nennt daher in diesem Falle sein Gleichgewicht unsicher, unbeständig oder labil. Er „schlägt um" und dreht sich so lange, bis sein Schwerpunkt lotrecht unter der Achse liegt; in dieser Lage ist sein Gleichgewicht sicher, beständig oder stabil; denn wird es aus dieser Lage herausgebracht, so führt ihn die Schwerkraft immer wieder dahin zurück. Überhaupt sucht der Schwerpunkt eines Körpers die tiefstmögliche Lage einzunehmen; diese entspricht dem stabilen Gleichgewichte. Eine Kette z. B., weche schlaff an ihren Endpunkten aufgehängt ist, hängt sich von selbst so, dafs ihr Schwerpunkt möglichst tief liegt. Es beruhen hierauf einige Spielereien (berganlaufender Cylinder und Doppelkegel, Stehaufchen u. s. w.), welche auf den ersten Blick diesem Satze zu widersprechen scheinen, denselben aber nur bestätigen.

Standfestigkeit (Stabilität) nennt man das Vermögen eines Körpers, seine Stellung der Schwerkraft gegenüber zu behaupten. Auf einer wagrechten Ebene bleibt ein Körper stehen, wenn die durch seinen Schwerpunkt, in welchem das Gewicht des Körpers vereinigt zu denken ist, gezogene lotrechte Linie die Unterstützungs-

fläche des Körpers trifft. Stützt sich ein Körper nur in einzelnen Punkten auf die Unterlage, so ist als Unterstützungsfläche die Fläche anzusehen, welche man erhält, wenn man die äufsersten Stützpunkte durch gerade Linien verbindet. Bei einem stehenden Menschen bilden nicht blofs die Fufssohlen, sondern auch der zwischen ihnen liegende Raum, welcher beiderseits von den Sohlen, vorn durch eine die Fufsspitzen, hinten durch eine die Fersen verbindende gerade Linie begrenzt wird, die Stützfläche. Trägt ein Mensch eine Last, so mufs er, um nicht zu fallen, seinen Körper derart neigen, dafs die durch den gemeinsamen Schwerpunkt des Körpers und der Last gezogene Lotrechte den Boden innerhalb jener Stehfläche trifft. Um einen Körper umzuwerfen, mufs man ihn um eine Kante oder einen Punkt ($a$ Fig. 28) des Umfanges seiner Unterstützungsfläche so lange drehen, bis sein Schwerpunkt lotrecht über jenem Punkte liegt; läfst man ihn los, ehe diese Lage erreicht ist, so fällt er in seine frühere Stellung zurück; dreht man ihn aber nur ein wenig über jene Lage hinaus, so stürzt er um und bleibt in einer neuen Stellung liegen. Soll das Umkanten durch eine wagrecht am Schwerpunkte ($S$) des Körpers angreifende Kraft ($K$) bewirkt werden, so mufs das Drehungsbestreben (Moment) dieser Kraft dem entgegengesetzten der Schwere ($G$) mindestens gleich sein, oder die Kraft $K$, multiplizirt mit ihrer Entfernung ($a\,b$) vom Drehpunkte (d. h. mit der Höhe des Schwerpunktes über der Grundfläche), mufs gleich sein der Kraft $G$ oder dem Gewichte des Körpers, multiplizirt mit ihrer Entfernung ($a\,c$) vom Drehpunkte (d. h. mit der halben Breite der Stützfläche). Die Standfestigkeit des Körpers, für welche die Kraft $K$ das Mafs darstellt, steht demnach im geraden Verhältnis zu dem Gewichte des Körpers und zur Breite seiner Stützfläche und im umgekehrten Verhältnis zur Höhe des Schwerpunktes über der Grundfläche, oder ein Körper steht um so fester, je gröfser sein Gewicht und je breiter seine Stützfläche ist, und je tiefer sein Schwerpunkt liegt. Damit Kandelaber, Kleiderstöcke und andere Möbel von gröfserer Höhe möglichst fest stehen, gibt man ihnen daher durch weit ausgreifende Füfse eine möglichst breite Stützfläche; damit Lampen nicht zu leicht umfallen, versieht man sie mit einem schweren Fufsgestell, so dafs der Schwerpunkt des Ganzen möglichst tief zu liegen kommt; zu demselben Zweck wird man beim Beladen eines Wagens die schweren Frachtstücke zu unterst, die leichteren Gegenstände aber zu oberst packen.

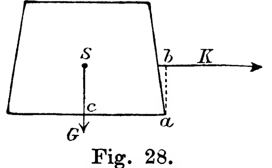


Fig. 28.
Standfestigkeit.

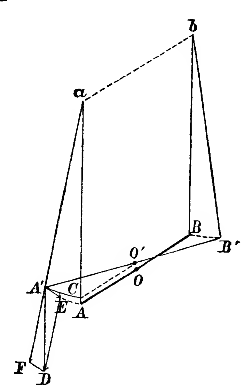


Fig. 29.
Bifilare Aufhängung.

Ein weiteres Beispiel dafür, dafs der Schwerpunkt stets die tiefste Lage aufsucht, bietet ein an zwei gleichlangen Fäden $aA$, $bB$ Fig. 29 aufgehängter Stab (bifilare Aufhängung). Dreht man ihn aus seiner Gleichgewichtslage heraus, so wird sein Schwerpunkt von $O$ nach $O'$ in die höher gelegene horizontale Ebene $A'O'C$ gehoben. In $A'$ (und ebenso in $B'$) wirkt aber die Kraft $A'D = {}^1/_2 P$ (gleich dem halben Gewicht des Stabes) vertikal abwärts; sie läfst sich in zwei zu einander senkrechte Komponenten zerlegen, deren eine $A'F$ in die Richtung des Fadens fällt und denselben gespannt hält, während die andere $A'E$ das Stabende $A'$ längs der Tangente des Kreisbogens $A'A$ nach $A$ zurücktreibt. Wegen der Ähnlichkeit der Dreiecke $A'DE$ und $A'aC$ aber ist $A'E : A'D = A'C : A'a$, oder wenn man den Winkel $A'O'C$, den der Stab mit seiner Gleichgewichtslage bildet, mit $\alpha$, die halbe Stablänge mit $r$, und die Fadenlänge mit $l$ bezeichnet, $A'E : {}^1/_2 P = r \sin \alpha : l$. Es ist also

$$A'E = \frac{Pr \sin \alpha}{2l},$$

und das Moment des Kräftepaares (denn in $B'$ wirkt ja die gleiche Kraft in entgegengesetzter Richtung), welches den Stab in die Gleichgewichtslage zurückzudrehen strebt, ist $A'E \,.\, 2r$ oder $Pr^2 \sin \alpha / l$.

33. **Wage.** Die Wage dient zur Vergleichung von Massen mit bekannten Massen (Gewichten). Die gewöhnliche Wage ist ein gleicharmiger Hebel, d. h. ein um eine in seiner Mitte angebrachte stählerne Schneide, die auf einer Unterlage von Stahl oder Achat ruht, leicht drehbarer Balken (Wagebalken), an dessen Enden auf mit der Mittelschneide parallelen stählernen Schneiden mittels ebensolcher Haken oder sog. Pfannen die Wagschalen aufgehängt sind (Gehänge). Die Mittelschneide liegt mit den Endschneiden in derselben Ebene. Beim Nichtgebrauch sowie beim Auflegen und Abnehmen von Gewichten werden zur Schonung der Schneiden Balken und Gehänge durch die Arretirung abgehoben und unterstützt. Damit im unbelasteten Zustande oder bei gleicher beiderseitiger Belastung der Wagebalken im sicheren (stabilen) Gleichgewicht wagrecht schwebe, mufs sein Schwerpunkt unterhalb der Drehungsschneide liegen. Ein am Wagebalken senkrecht befestigter Zeiger (die Zunge) läfst durch sein Einspielen auf eine Marke oder auf den Nullpunkt einer Skala diese Stellung leicht erkennen. Legt man nun auf die eine Wagschale ein kleines Übergewicht, so wird sich der Wagebalken nach dieser Seite hin neigen, und sein Schwerpunkt wird nach der anderen Seite so weit gehoben, bis das in demselben angreifende Gewicht des Wagebalkens ein ebenso grofses entgegengesetztes Drehungsbestreben erlangt hat, wie das am Ende des Wagebalkens angreifende Übergewicht. Den Winkel, welchen die Zunge in dieser neuen Lage mit der lotrechten Linie bildet, nennt man den Ausschlagswinkel. Damit bei verschiedener Gesamtbelastung der Wage das nämliche Übergewicht immer den gleichen Ausschlag gebe, mufs die Mittelschneide mit den Endschneiden in derselben Ebene liegen. Die Empfindlichkeit der Wage ist um so gröfser, einen je gröfseren Ausschlagswinkel sie für ein bestimmtes Übergewicht gibt. Der Schwerpunkt des Wagebalkens wird aber, damit sein Hebelarm grofs genug werde, um so höher gehoben werden müssen und demnach der Ausschlagswinkel um so gröfser werden,

je kleiner das Gewicht des Wagebalkens ist, je näher sein Schwerpunkt unter der Drehungsschneide liegt, und je gröſser andererseits der Hebelarm des Übergewichtes, d. h. je länger der Wagebalken ist. Um eine Wage möglichst empfindlich zu machen, legt man daher den Schwerpunkt sehr nahe unter die Schneide und macht den Wagebalken bei hinreichender Stärke möglichst lang und möglichst leicht. Um letzteres zu erreichen, gibt man bei feinen Wagen dem Wagebalken eine durchbrochene Gestalt, und um die Lage des Schwerpunktes reguliren zu können, befindet sich über dem Wagebalken eine feine Schraubenspindel, an welcher eine Schraubenmutter als Laufgewicht auf- und niedergeschraubt werden kann. Um Gewichtsbeträge kleiner als 1 cg zu bestimmen, wird auf den in 10 gleiche Teile geteilten Arm des Balkens ein 1 cg schwerer gebogener Platindraht (Reiter) aufgesetzt und bis zur Herstellung des Gleichgewichts verschoben. Die Ziffer des Teilstrichs gibt alsdann an, wie viele Milligramme auf die Wagschale hätten gelegt werden müssen. Sind die Hebelarme einer Wage nicht genau gleich, was eigentlich immer der Fall, da es auch dem geschicktesten Mechaniker nicht gelingt, sie vollkommen gleich zu machen, so kann man dennoch genau mit ihr wägen, entweder durch doppelte Wägung, indem man den Körper auf jeder Wagschale einmal abwägt und aus den Ergebnissen das Mittel nimmt, oder durch Substitution, indem man den Körper durch beliebige auf die andere Wagschale gelegte Gegenstände, z. B. Schrotkörner (Tara), ins Gleichgewicht bringt, sodann den Körper wegnimmt und ihn bis zur Herstellung des Gleichgewichts durch Gewichte ersetzt. Die Empfindlichkeit einer Wage drückt man im allgemeinen durch den Ausschlag für ein bestimmtes kleines Übergewicht aus, bei feinen Wagen z. B. durch den Ausschlag für 1 mg Übergewicht. Gute Wagen für physikalische Zwecke sind so empfindlich, daſs sie ein Milliontel des höchsten Gewichts angeben, das sie zu tragen bestimmt sind. Die Genauigkeit der Wägung wird noch erheblich gesteigert, wenn man über der Mitte des Wagebalkens senkrecht zu dessen Länge einen kleinen Spiegel befestigt und durch ein Fernrohr das Spiegelbild einer daneben vertikal aufgestellten Skala beobachtet, wodurch sehr kleine Ausschlagswinkel meſsbar werden (Spiegelablesung).

Zu wissenschaftlichen Zwecken bedient man sich nur gleicharmiger Wagen, im öffentlichen Verkehr aber auch ungleicharmiger.

Die römische oder Schnellwage ist ein zweiarmiger, ungleicharmiger Hebel, an dessen kürzerem Arm die zu wägende Last hängt, welche durch ein einziges, am längeren Arm verschiebbares Gewicht, den Läufer, im Gleichgewicht gehalten wird; an einer auf dem längeren Arm aufgetragenen Teilung kann man an der Stelle, wohin der Läufer zur Herstellung des Gleichgewichts jedesmal geschoben werden muſs, das Gewicht der Last unmittelbar ablesen. Zur Wägung gröſserer Lasten dienen die Brückenwagen; eine hölzerne Tafel, die Brücke, wird von einer Hebelverbindung ge-

tragen, die so eingerichtet ist, daſs die Brücke während ihres Spieles immer genau wagrecht bleibt und auf eine an ihrem Ende eingehakte Zugstange immer einen dem Gewichte der Last gleichen Zug ausübt, an welche Stelle der Brücke man die Last auch bringen mag. Bei der Quintenz'schen Decimalwage (1823) wird dies auf folgende Weise erreicht. Die Last $Q$ (Fig. 30), welche irgendwo auf der bei $A$ um eine Schneide drehbaren Brücke $AB$ liegt, kann in zwei Kräfte, $q$ und $q'$ zerlegt werden, deren Summe gleich $Q$ ist, die eine, $q$, wirkt bei $B$ unmittelbar an der am Wagebalken $GH$ bei $F$ angehängten Zugstange $BF$, die andere, $q'$, drückt bei $A$ auf den um $C$ drehbaren unteren Hebel $CD$, und kann, wenn der Hebelarm $CD$ $n$mal so groſs ist als der Hebelarm $CA$, durch die Kraft $q'/n$ in $D$ ersetzt werden, welche an der bei $G$ am Wagbalken angehängten

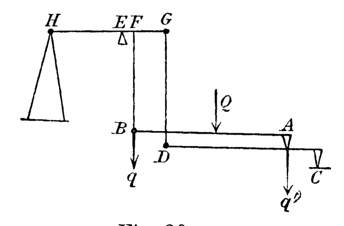



Fig. 30.
Brückenwage.

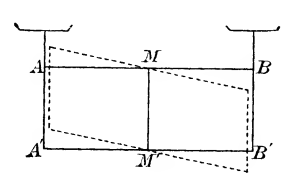



Fig. 31.
Oberschalige Tafelwage.

Stange $DG$ zieht. Hat man nun auch $EG$ ($E$ ist der Drehungspunkt des Wagebalkens) $n$mal so groſs gemacht als $EF$, so kann man sich statt der Kraft $q'/n$ in $G$ die $n$mal so groſse Kraft $q'$ in $F$ wirkend denken, so daſs die Last $Q = q + q'$, an welcher Stelle der Brücke sie auch liegen mag, gerade so wirkt, als wäre sie unmittelbar an die Zugstange $BF$ angehängt. Macht man nun den Hebelarm $EH$, welcher die Wagschale trägt, 10mal (oder 100mal) so lang als den Hebelarm $EF$, so kann man die Last mit einem 10mal (oder 100mal) kleineren Gewichte ins Gleichgewicht setzen (Decimal- und Centesimalwagen).

Bei Neigungs- oder Zeigerwagen bewegt sich der längere Arm eines Winkelhebels als Zeiger längs einer durch Versuche eingeteilten kreisbogenförmigen Skala, wenn man die Last an dem anderen kürzeren Arme wirken läſst.

Die oberschalige Tafelwage (Roberval, 1670) besteht dem Wesen nach aus zwei gleich langen, um ihre Mittelpunkte $M$ und $M'$ (Fig. 31) drehbaren Balken $AB$ und $A'B'$, welche durch zwei lotrechte Stangen $AA'$, $BB'$ zu einem Parallelogramm beweglich verbunden sind, und oben die fest mit ihnen verbundenen Wagschalen tragen.

34. **Centralbewegung.** Wir betrachten jetzt die Bewegung eines Körpers, der, nachdem ihm eine Anfangsgeschwindigkeit erteilt worden, der Einwirkung einer Kraft überlassen wird, die stets nach

einem festen Mittelpunkte (Centrum) hin gerichtet ist. Der Körper, der vermöge seiner Trägheit in der Richtung *AB* (Fig. 32) mit der ihm erteilten Anfangsgeschwindigkeit in gleichförmiger Bewegung fortzugehen bestrebt ist, wird durch die nach dem Mittelpunkte *O* wirkende Kraft, welche man Centralkraft oder auch Centripetalkraft nennt, von der Linie *AB* abgezogen; ist *AC* die Strecke, um welche diese Kraft ihn dem Centrum nähert in der Zeit, während welcher er vermöge der Trägheit von *A* bis *B* gelangen würde, so findet man den Ort *D*, welchen er nach dieser Zeit thatsächlich einnimmt, als Durchschnittspunkt der Linien *CD* und *BD*, die beziehungsweise parallel mit *AB* und *AC* gezogen werden. Der Weg, welchen der Körper von *A* bis *D* zurücklegt, ist eigentlich bogenförmig gekrümmt, fällt aber um so genauer mit der geraden Verbindungslinie *AD* zusammen, während eines je kleineren Zeitraumes wir die Bewegung betrachten. Nehmen wir daher diesen Zeitraum hinlänglich klein an (und wir können ihn uns ja so klein denken als wir immer wollen), so darf der Weg von *A* bis *D* als geradlinig angesehen werden. Während eines zweiten gleichgroſsen Zeitteilchens würde nun der Körper vermöge seiner Trägheit unter Beibehaltung seiner in *D* vorhandenen Richtung und Geschwindigkeit die Strecke *DE* = *AD* zurücklegen, wenn er nicht durch die von *D* nach *O* hin wirkende Kraft von der Linie *DE* um die Strecke *DF* abgezogen und nach dem Eckpunkte *G* des Parallelogramms *DEGF* zu gehen genötigt würde. Ebenso wird er während des dritten gleichgroſsen Zeitteilchens, statt die mit *DG* gleiche und gleichgerichtete Strecke *GH* infolge der Trägheit zu durchlaufen, nach dem Eckpunkte *K* des Parallelogramms *GHKI* gelangen etc. Der Körper durchläuft also unter dem Einfluſs der ihn unausgesetzt nach dem Centrum *O* hinziehenden Kraft die krumme Linie *ADGK*, welcher sich die gebrochene Linie *ADGK* um so mehr nähert, je kleiner wir die der Betrachtung zu Grunde gelegten Zeitteilchen werden lassen. Die Bewegungsrichtung, welche der Körper in jedem Punkte seiner gekrümmten Bahn besitzt, wird offenbar angegeben durch die in diesem Punkte an die Bahn gelegte Berührungslinie (Tangente). Die geradlinige Bewegung, welche der Körper infolge des Beharrungsvermögens annehmen würde, wenn in irgend einem Punkte seiner Bahn die Centralkraft aufhörte zu wirken, nennt man daher auch seine Tangentialbewegung. Die vom Mittelpunkte *O* in jedem Augenblick nach dem bewegten Körper gezogen gedachte gerade Linie, nach welcher die Kraft wirkt, heiſst der Leitstrahl oder Radiusvector des Körpers. Während der Körper von *A* nach *D* übergeht, durchstreicht sein Leitstrahl den Flächen-

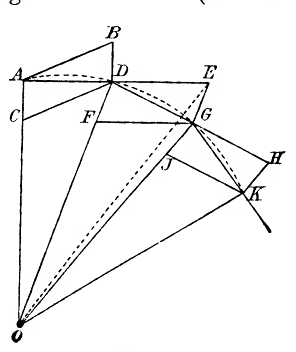


Fig. 32.
Centralbewegung.

raum $AOD$, beim Übergange von $D$ nach $G$ den Flächenraum $DOG$ etc. Diese Flächenräume, welche eigentlich von den krummlinigen Bahnstücken $AD$, $DG$ etc. begrenzt sind, unterscheiden sich von den Dreiecken $AOD$, $DOG$ etc. um so weniger, je kleiner wir uns die zugehörigen gleichen Zeiträume denken. Man erkennt nun leicht, dafs das Dreieck $DOG$ dem Dreieck $AOD$ an Flächeninhalt gleich ist und so überhaupt jedes folgende Dreieck dem vorhergehenden.[1]) Es ergibt sich also der folgende Satz: bei jeder Centralbewegung beschreibt der Leitstrahl in gleichen Zeiten gleiche Flächenräume (Flächensatz). Dieser Satz gilt auch umgekehrt. Wenn ein Körper sich so bewegt, dafs der von ihm nach einem Punkte gezogene Leitstrahl in gleichen Zeiten gleiche Flächenräume durchstreift, so wirkt auf ihn eine stets nach diesem Punkte hin gerichtete Kraft (welche im Falle einer geradlinigen gleichförmigen Bewegung Null ist).

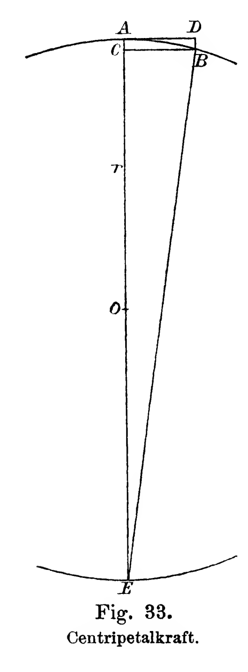


Fig. 33.
Centripetalkraft.

35. **Centripetalkraft.** Unter besonderen Umständen ist die krummlinige Bahn, die ein Massenpunkt unter der Wirkung einer Centralkraft beschreibt, ein Kreis. Derselbe wird, wie aus der Anwendung des Flächensatzes unmittelbar folgt, mit konstanter Geschwindigkeit durchlaufen. Ist $v$ diese Geschwindigkeit des Massenpunktes $A$ auf einem Kreise vom Radius $r$, so hat man die Frage aufzuwerfen, wie grofs die Centralkraft sein mufs, um den Punkt gerade in diese kreisförmige Bewegung zu zwingen, und erhält ihre Beantwortung durch folgende Betrachtung. Ist $AB$ der Weg, den der Massenpunkt während einer sehr kleinen Zeit $\tau$ längs der Kreisbahn zurücklegt und fällt man von $B$ (Fig. 33) die Senkrechte $BC$ auf den von $A$ durch den Mittelpunkt $O$ des Kreises gezogenen Durchmesser $AE$, so ist $AC$ die kleine Strecke, um welche der Punkt während derselben Zeit $\tau$ durch die Centripetalkraft von der Tangente $AD$ weg, längs welcher zu gehen er vermöge der Trägheit bestrebt ist, gegen den Mittelpunkt $O$ hingezogen wird. Nun ist das rechtwinklige Dreieckchen, dessen Hypotenuse die Sehne $AB$ ist, ähnlich dem Dreieck $AEB$, das den Durchmesser $AE = 2r$ zur Hypotenuse hat. Es ist daher

$$AC : AB = AB : AE.$$

---

[1]) Denn zieht man $OE$, so ist Dreieck $DOG$ flächengleich mit Dreieck $DOE$, weil $EG$ parallel ist zu ihrer gemeinschaftlichen Grundlinie $DO$; es ist aber auch $AOD$ flächengleich mit $DOE$, weil diese Dreiecke bei gleichen Grundlinien ($AD = DE$) ihre gemeinschaftliche Spitze in $O$ haben; folglich ist $DOG = AOD$.

Je kleiner man das Zeitteilchen $\tau$ und sonach $AB$ annimmt, um so genauer wird der Bogen $AB = v\tau$ der Sehne $AB$ gleich; für ein hinreichend kleines Zeitteilchen ergibt sich also:

$$AC : v\tau = v\tau : 2r$$

und daraus:

$$AC = \frac{v^2\tau^2}{2r}.$$

Während eines genügend kleinen Zeitteilchens aber kann man die nach $O$ hin wirkende Kraft als unveränderlich und demnach die von ihr erzeugte Bewegung als eine gleichförmig beschleunigte ansehen. Bezeichnen wir mit $c$ die zugehörige Beschleunigung, so ist der während der Zeit $v$ zurückgelegte Weg:

$$AC = {}^1/_2\, c\tau^2.$$

Es ergibt sich also durch Gleichsetzung dieses Wertes mit dem vorigen:

$$^1/_2\, c\tau^2 = \frac{v^2\tau^2}{2r},$$

also die Centripetalbeschleunigung:

$$c = \frac{v^2}{r}.$$

Die Centripetalkraft $C$ selbst wird erhalten, wenn man die Beschleunigung $c$ mit der Masse $m$ des bewegten Punktes multiplizirt; es ist also:

$$C = \frac{mv^2}{r}.$$

Die Centripetalkraft steht also im geraden Verhältnis zur Masse und zum Quadrate der Geschwindigkeit des bewegten Körpers und im umgekehrten Verhältnis zum Halbmesser der Bahn.

Dieser Satz, welcher sich aus der Betrachtung der gleichförmigen Bewegung in kreisförmiger Bahn ergab, gilt übrigens für jede beliebige krummlinige Bewegung. Denn für jeden Punkt einer krummen Linie läſst sich ein Kreis (der Krümmungskreis) angeben, dessen Umfang sich in diesem Punkte der Kurve aufs innigste anschmiegt, so daſs der Massenpunkt, indem er diese Stelle seiner Bahn passirt, eine sehr kurze Zeit lang auf diesem Kreise sich bewegt. Bei beliebig krummliniger Bahn hat man daher in obigem Ausdruck statt des unveränderlichen Halbmessers $r$ den von Punkt zu Punkt veränderlichen Krümmungshalbmesser $\varrho$ zu setzen. Der Quotient $1/\varrho$ ist das Mass für die Krümmung der Kurve.

Man kann übrigens auch unmittelbar einsehen, daſs die Kraft, welche nötig ist, um einen bewegten Körper von der geraden Linie abzulenken, um so gröſser sein muſs, je gröſser die Wucht ($^1/_2\, mv^2$)

des dahineilenden Körpers und je stärker die Krümmung $1/\varrho$ der Bahn ist.

Bei gleichförmiger Kreisbewegung gibt man gewöhnlich statt der Geschwindigkeit $v$ die Umlaufszeit $T$ (in Sekunden) an, d. h. die Zeit, die der Körper gebraucht, um den ganzen Kreisumfang $2\pi r$ zurückzulegen; alsdann ist $v = 2\pi r / T$. Setzt man diesen Wert in den Ausdruck für $C$ ein, so ergibt sich:

$$C = \frac{4\pi^2 m r}{T^2};$$

man kann daher auch sagen: Die Centripetalkraft eines gleichförmig im Kreise bewegten Körpers ist der Masse und dem Halbmesser direkt, dem Quadrate der Umlaufszeit umgekehrt proportional.

36. **Centrifugalkraft.** Wenn eine Lokomotive auf gekrümmter Bahn dahinfährt, so hat sie vermöge der Trägheit in jedem Augenblick das Bestreben, entlang der Berührungslinie $AB$ (Fig. 34) der Bahn geradeaus zu gehen und demnach eine Richtung einzuschlagen, welche sie von dem Krümmungsmittelpunkt $O$ der Bahnkurve entfernen würde; dieses Bestreben äufsert sich durch einen Druck $AC$, welchen die Lokomotive vermittelst der Radkränze nach aufsen hin, von dem Mittelpunkte weg, auf die äufsere Schiene ausübt; dieser Druck oder diese Kraft heifst die Centrifugalkraft (Fliehkraft, Schwungkraft). Ihr wirkt von seiten der unnachgiebigen Schienen eine gleich grofse nach innen (dem Mittelpunkt zu) gerichtete Kraft $AD$ entgegen, welche als Centripetalkraft die Lokomotive zwingt, auf der Kurve zu bleiben. Centripetalkraft und Centrifugalkraft sind daher als Wirkung und Gegenwirkung einander stets gleich und entgegengesetzt. Die Centrifugalkraft ist hienach nichts anderes, als der Widerstand, den die bewegte Masse vermöge ihrer Trägheit der Beschleunigung nach dem Krümmungsmittelpunkte zu entgegensetzt (Trägheitswiderstand). Sie macht sich bei jeder krummlinigen Bewegung geltend. Wird z. B. ein am Ende einer Schnur befestigter oder in eine Schleuder gelegter Stein rasch im Kreis herumgeschwungen, so erleidet die Schnur eine Spannung, welche, als Centripetalkraft nach einwärts wirkend, den Stein nötigt, von der gradlinigen Bewegung abzuweichen und eine Kreislinie zu beschreiben, und als Centrifugalkraft nach aufsen hin einen Zug auf die Hand ausübt, welche das andere Ende der Schnur festhält. Wird nun der Faden plötzlich durchschnitten, oder läfst man das eine Schnurende der Schleuder los, so hört mit der Centripetalkraft auch die Centrifugalkraft plötzlich auf, und der Stein fliegt nun, der Trägheit ge-

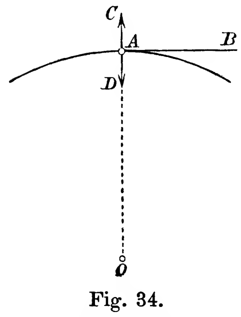


Fig. 34.
Centrifugalkraft.

horchend, in der Richtung der Tangente davon mit der Geschwindigkeit, die er im Augenblick des Loslassens gerade besafs. Wenn Mühlsteine, Schleifsteine, Schwungräder mit zu grofser Geschwindigkeit sich um ihre Achse drehen, so kann die Centrifugalkraft selbst das Zerreifsen derselben herbeiführen, so dafs die in tangentialer Richtung fortgeschleuderten Stücke bisweilen grofses Unheil anrichten. In der Centrifugaltrockenmaschine (Centrifuge) wird von diesem Verhalten eine nützliche Anwendung gemacht zum Trocknen der Wäsche, zum Gewinnen des Saftes aus zerriebenen Runkelrüben, zum Reinigen der Krystalle von ihrer Mutterlauge etc., indem man z. B. die nassen Gewebe in eine cylindrische Trommel bringt, deren Umfang aus Drahtgewebe besteht; wird nun die Trommel in rasche Umdrehung versetzt, so werden die Zeuge durch die Fliehkraft mit grofser Gewalt gegen den Umfang der Trommel geprefst, und das sie benetzende Wasser wird in tangentialer Richtung durch das Drahtnetz hinausgespritzt. Sehr anschaulich tritt die Wirkung der Centrifugalkraft auch hervor, wenn man ein mit Wasser gefülltes Trinkglas, an einer Schnur befestigt, wie eine Schleuder im Kreis herumschwingt; auch in dem höchsten Punkte der Kreisbahn, wo die Öffnung des Glases nach unten gekehrt ist, fliefst das Wasser nicht aus, weil es von der Schwungkraft, welche hier der Schwere entgegenwirkt, daran gehindert wird. Ähnliches beobachtet man bei der Centrifugalbahn (Fig. 35); ein kleiner Wagen, welcher, von der Plattform $A$ herabkommend, bei $B$ die der vertikalen Fallhöhe $AB$ entsprechende Geschwindigkeit besitzt, durchläuft die kreisförmige Schlinge $BC$ der Schienenbahn, bei $C$ mit den Rädern nach oben, um schliefslich auf der Plattform $D$ anzulangen.

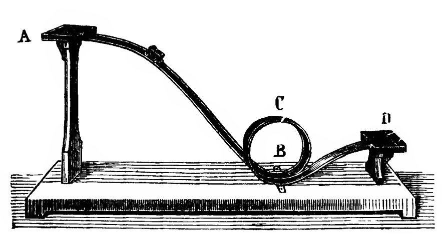



Fig. 35.
Centrifugalbahn.

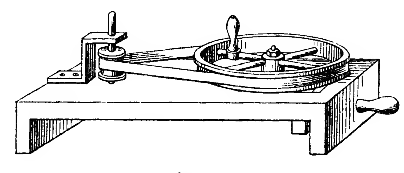


Fig. 36.
Centrifugalmaschine.

Da die Centrifugalkraft der Centripetalkraft stets gleich ist, so wird ihre Gröfse durch dieselben Ausdrücke

$$C = \frac{mv^2}{r} \text{ und } C = \frac{4\pi^2 mr}{T^2}$$

bestimmt.

Zum Nachweis der Centrifugalkraft und dieser ihrer Gesetze bedient man sich der Centrifugal- oder Schwungmaschine.

Zwei Räder mit parallelen Achsen (Fig. 36), ein gröſseres, das Schwungrad, und ein kleineres, dessen Achse zum Aufstecken verschiedener Versuchsvorrichtungen eingerichtet ist, sind durch eine um ihre ausgehöhlten Umfänge gelegte Schnur (oder einen Riemen) ohne Ende miteinander verbunden, so daſs sich, wenn das groſse Rad mittels einer Kurbel umgedreht wird, die Achse des kleinen Rades mit sovielmal gröſserer Geschwindigkeit dreht, als der Umfang (oder der Halbmesser) des groſsen Rades gröſser ist als der des kleineren. Es werde z. B. auf die Achse ein Holzrähmchen aufgesetzt, in welchem ein wagerechter Metalldraht ausgespannt ist; auf demselben sind zwei durchbohrte Metallkugeln, die durch eine Schnur miteinander verbunden sind, leicht verschiebbar; befinden sich die beiden Kugeln auf verschiedenen Seiten der Achse, so werden sie bei der Umdrehung vermöge der Centrifugalkraft auseinander fahren, und diejenige Kugel, deren Centrifugalkraft die gröſsere ist, wird die andere nach sich ziehen; man findet nun leicht eine solche Stellung der Kugeln diesseits und jenseits der Achse, daſs bei der Umdrehung die Kugeln in Ruhe bleiben, indem ihre Centrifugalkräfte sich das Gleichgewicht halten; dies tritt ein, wenn ihre Entfernungen von der Drehungsachse sich umgekehrt verhalten wie ihre Massen, oder wenn die Produkte aus den Massen und den Halbmessern der durchlaufenen Kreise für beide Kugeln gleich sind. Bei gleicher Umlaufszeit verhalten sich also die Centrifugalkräfte wie die Massen und wie die Halbmesser der Kreisbahnen. Wird ferner auf die Achse der Centrifugalmaschine eine lotrechte Welle aufgesteckt, woran zwei Kugeln an Drähten, die sich oben in Scharniren drehen, pendelartig herabhängen, so entfernen sich die Kugeln bei wachsender Umdrehungsgeschwindigkeit immer mehr von der Achse und heben ein längs der Achse verschiebbares Gewicht; diese Einrichtung findet als Centrifugalregulator bei Dampfmaschinen praktische Verwertung. — Wird eine hohle Glaskugel (Fig. 37), welche teilweise Quecksilber, teilweise gefärbtes Wasser enthält, mittels der Maschine um ihre vertikale Achse rasch gedreht, so erlangt das Quecksilber infolge seiner gröſseren Masse auch gröſsere Centrifugalkraft, entfernt sich weiter von der Achse als das Wasser, und bildet am Äquator der Kugel einen glänzenden Streifen, über den oben und unten eine Zone des weiter innen gebliebenen Wassers hervorragt. — Ein elastischer Metallreif, der auf eine lotrechte Welle lose aufgesteckt ist, so daſs diese als sein senkrechter Durchmesser erscheint, wird durch die Centrifugalkraft, welche an den von der Achse am weitesten entfernten Endpunkten seines wagrechten Durchmessers am stärksten wirkt, zu einer Ellipse auseinander gezogen und versinnlicht dadurch die Entstehung der Abplattung der Erde. — Um nachzuweisen, daſs die Centrifugalkraft dem Quadrat der Geschwindigkeit proportional

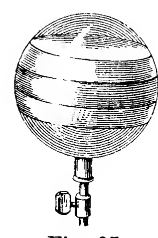


Fig. 37. Zur Centrifugalmaschine.

ist, kann man sich einer Centrifugalmaschine bedienen, welche nebst dem Schwungrad noch zwei kleinere Räder besitzt, von denen das eine einen nur halb so groſsen Durchmesser hat als das andere und sich daher, von dem nämlichen Schnurlauf getrieben, doppelt so schnell dreht. Auf jede der beiden Achsen setzt man einen Rahmen mit einem horizontalen Draht, auf welchem eine durchbohrte Kugel gleitet; an der Kugel ist ein Faden befestigt, welcher über zwei Röllchen geführt ist, die übereinander an einem kleinen Galgen angebracht sind, der sich in der Mitte des Rahmens erhebt; das von der oberen Rolle herabhängende Schnurende trägt eine zur Aufnahme von Gewichten bestimmte Platte, welche von den Pfosten des Galgens senkrecht geführt wird. Die beiden Rahmen sind in allen ihren Teilen vollkommen gleich. Beide Platten werden nun, wenn man die Maschine in Umdrehung versetzt, durch die an den Fäden ziehenden Centrifugalkräfte gleichzeitig gehoben, wenn die mit doppelter Geschwindigkeit umlaufende mit einem viermal so groſsen Gewicht belastet ist.

Hängt man ein cylindrisches Metallstäbchen mittels eines Fadens an das untere Ende der Achse der Centrifugalmaschine, so rotirt es anfangs um die vertikal stehende Cylinderachse (Fig. 38 *A*), bei der geringsten zufälligen Abweichung aus dieser Lage entsteht aber durch die Centrifugalkräfte, welche die Masse des Körpers so weit als möglich von der Achse zu entfernen streben, ein Kräftepaar, wodurch das Stäbchen endlich in die horizontale Lage *B* übergeführt wird. In diese stabile Lage, zu deren Herstellung die Centrifugalkräfte die gröſstmögliche Arbeit geleistet haben, kehrt das Stäbchen nach etwaiger Störung von selbst wieder zurück. Ebenso stellt sich ein an dem Faden hängender Ring, der anfangs um seinen vertikalen Durchmesser gedreht wird, in eine horizontale Ebene ein.

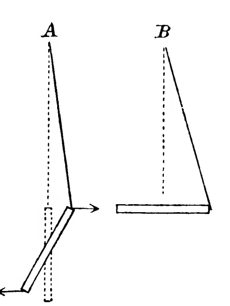


Fig. 38.
Rotirendes Stäbchen.

Die durch die tägliche Umdrehung der Erde erzeugte Centrifugalkraft ist an jedem Ort senkrecht zur Erdachse und von dieser weg gerichtet; da für alle Punkte der Erdoberfläche die Umlaufszeit die nämliche ist, nämlich 24 Stunden (Sternzeit), so ist die Centrifugalkraft an jedem Ort dem Halbmesser des Parallelkreises proportional, welchen der Ort während der täglichen Umdrehung beschreibt. Am Äquator, wo sie der Schwerkraft gerade entgegenwirkt, ist sie am gröſsten und beträgt $^1/_{289}$ der Schwerkraft.

37. **Kreiselbewegung.** Ist die Masse eines starren Körpers, der sich um eine Achse dreht, rings um die Achse gleichmäſsig verteilt, so wirkt auf diese keine aus der Drehung entspringende Kraft, da ja die Schwungkraft eines jeden Massenteilchens durch die gleiche und entgegengesetzte Schwungkraft des gerade gegenüberliegenden Massenteilchens aufgehoben wird; in diesem Falle wird die Achse

eine **freie** Achse genannt. Da jedes um eine freie Achse kreisende Massenteilchen vermöge der Trägheit in seiner zur Achse senkrechten Drehungsebene zu verharren strebt, so zeigt infolgedessen auch die freie Achse das Bestreben, ihre Richtung im Raum zu bewahren, und setzt daher einer äufseren Kraft, welche sie aus dieser Richtung bringen will, einen um so gröfseren Widerstand entgegen, je gröfser die Wucht der Drehungsbewegung ist. Daher kommt es, dafs ein hinlänglich rasch sich drehender Kreisel nicht umfällt, selbst wenn seine Achse schief steht (Fig. 39), und dafs Räder (Velociped), Reife, Geldstücke etc. nicht umfallen, wenn man sie auf ihrem Rand rollen oder um den lotrechten Durchmesser „tanzen" läfst. Die Wirkung der störenden Kraft (nämlich der Schwerkraft) auf den Kreisel äufsert sich vielmehr dadurch, dafs die Achse in einer zur Richtung der störenden Kraft senkrechten Richtung ausweicht und in langsamer Bewegung die Oberfläche eines Kegels beschreibt, ohne dafs die Achse ihre Neigung gegen die horizontale Ebene ändert (Fig. 40). Dreht sich nämlich eine kreisförmige Scheibe $ACBD$ (Fig. 41) um ihre in $M$ unterstützte Symmetrieachse $MS$ in der Richtung der gekrümmten Pfeile (von oben gesehen in der Richtung des Uhrzeigers) und bewirkt das im Schwerpunkt $S$ angreifende Gewicht des Kreisels eine kleine Senkung der Achse, also eine Drehung der Scheibe um ihren horizontalen Durchmesser $AB$ (oder um eine damit parallele Gerade), so bleiben die Bewegungsrichtungen des obersten und untersten Punktes $C$ und $D$, da sie nur eine parallele Verschiebung erleiden, ungeändert; an den beiden Enden des horizontalen Durchmessers $AB$ aber und in geringerem Mafse an anderen Punkten des Umfangs tritt eine Richtungsänderung ein, und aus dem Beharrungsvermögen der Scheibe entspringen in $A$ und $B$ die Kräfte $p$ und $p$ senkrecht zu ihrer Ebene. Diese gleichen und entgegengesetzten Kräfte bilden ein Kräftepaar, welches eine Drehung der Scheibe um den auf $AB$ senkrechten Durchmesser $CD$ und damit eine Vorwärtsbewegung

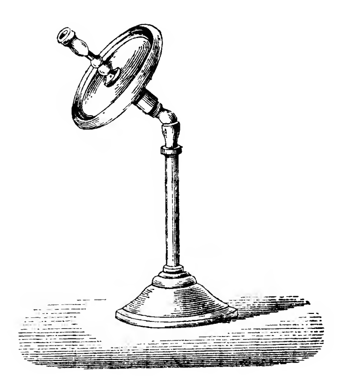


Fig. 39.
Kreisel.

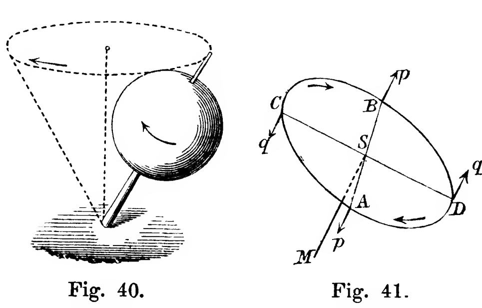
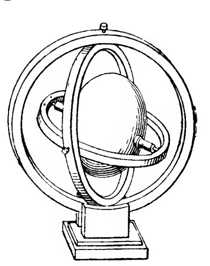



Fig. 40.
Kreisel.

Fig. 41.
Kreisel.

des oberen Endes der Achse im Sinne des Uhrzeigers bewirkt. Dadurch werden nun auch die Punkte *C* und *D* ihre Bewegungsrichtung zu verlassen genötigt, und das Widerstreben gegen diese Richtungsänderung gibt zu dem Kräftepaar *qq* Anlafs, welches die Scheibe um ihren horizontalen Durchmesser *AB* derart dreht, dafs die Achse sich hebt.

Das Bestreben einer freien Achse, ihre Richtung im Raum beizubehalten, läfst sich durch Bohnenbergers Rotationsapparat (Fig. 42) nachweisen, welcher aus einer Kugel besteht, deren Drehungsachse vermöge ihrer Aufhängung in drei ineinander drehbaren Ringen unbehindert jede beliebige Stellung annehmen kann. Versetzt man die Kugel durch Abziehen einer auf ihre Achse gewickelten Schnur in rasche Umdrehung, so bleibt die Achse mit sich selbst parallel, wie man auch den ganzen Apparat drehen und neigen mag. Beispiele von Drehung um freie Achsen bieten uns die Planeten und unter diesen die Erde dar. Die Erdachse würde, wenn die Erde eine vollkommene Kugel wäre, immerdar mit sich selbst parallel und stets nach dem Polarstern gerichtet bleiben. Aus der Anziehungskraft der Sonne auf die den Erdäquator umgürtende Anschwellung entspringt aber eine störende Kraft, welche die zur Ebene der Erdbahn (Ekliptik) unter einem Winkel von 66,5° geneigte Erdachse zur Bahnebene senkrecht zu stellen strebt. Ähnlich wie beim Kreisel ändert aber die Erdachse ihre Neigung zur Erdbahn nicht, sondern beschreibt im Verlauf von etwas mehr als 25800 Jahren einen Kegel von etwa 47° Öffnung um das auf der Ekliptik errichtete Lot, so dafs im Laufe der Jahrtausende nach und nach immer andere Sterne die Rolle des Polarsterns übernehmen werden; so wird z. B. nach etwa 12000 Jahren der schöne Stern Wega Polarstern sein. Diese kegelförmige Bewegung der Erdachse hat zur Folge, dafs die Nachtgleichenpunkte auf der Ekliptik jährlich um etwa 50 Bogensekunden nach Westen vorrücken, und wird daher das Vorrücken oder die Präcession der Nachtgleichen genannt.


Fig. 42.
Bohnenbergers Rotationsapparat.

38. **Winkelgeschwindigkeit.** Wenn sich ein Körper um eine Achse dreht, so beschreibt jeder seiner Punkte einen Kreis, dessen Mittelpunkt auf der Achse liegt, und dessen Ebene in diesem Punkt auf der Achse senkrecht steht. Die Geschwindigkeiten der verschiedenen Punkte stehen in demselben Verhältnis wie die Halbmesser der durchlaufenen Kreise oder, was dasselbe ist, wie die Abstände der Punkte von der Achse. Kennt man daher die Geschwindigkeit für irgend einen Abstand, z. B. für die Entfernung 1 von der Achse, so kennt man sie für alle Punkte des sich drehenden Körpers. Diese Geschwindigkeit in der Entfernung 1, d. h. die Länge des Kreisbogens, welchen ein von der Drehungsachse um die Längeneinheit abstehender Punkt in einer Sekunde durchläuft, nennt man Winkelgeschwindigkeit des sich drehenden Körpers. Ist dieselbe bekannt,

so findet man die Geschwindigkeit ($v$) irgend eines Punktes, wenn man die Winkelgeschwindigkeit ($\omega$) mit seinem Abstand $r$ von der Achse multiplizirt ($v = r\omega$). Man nennt sie „Winkelgeschwindigkeit“ deswegen, weil der Bogen des Kreises vom Halbmesser 1 als Maſs für die Gröſse des Winkels angesehen werden kann, um welchen sich der Körper in 1 sec dreht, oder wenn die Drehung ungleichförmig ist, drehen würde, wenn von dem betrachteten Augenblick an keine Geschwindigkeitsänderung mehr einträte. Unter Winkelbeschleunigung versteht man die nach der Zeiteinheit geschätzte Änderung der Winkelgeschwindigkeit.

39. **Trägheitsmoment.** Wenn sich ein Körper um eine Achse dreht, so besitzt jedes seiner Massenteilchen vermöge dieser Drehung eine Bewegungsenergie oder Wucht, welche ausgedrückt wird durch das halbe Produkt seiner Masse ($m$) mit dem Quadrat seiner Geschwindigkeit ($v$), d. h. diese Wucht beträgt $^1/_2\, m v^2$, oder, wenn $\omega$ die Winkelgeschwindigkeit, nämlich die Geschwindigkeit in der Entfernung 1, und $r$ den Abstand des Teilchens von der Drehungsachse bezeichnet, $^1/_2\, m r^2 \omega^2$. Eine Masse $\mu$ in der Entfernung 1 von der Achse besitzt bei der nämlichen Winkelgeschwindigkeit die Wucht $^1/_2\, \mu \omega^2$, welche der vorigen gleich ist, wenn man die Masse $\mu$ so wählt, daſs $\mu = m r^2$ ist. Man kann daher, ohne die Wucht des Körpers zu ändern, das im Abstand $r$ befindliche Teilchen $m$ durch ein anderes von der Masse $m r^2$ im Abstand 1 von der Drehungsachse ersetzen. Multiplizirt man in dieser Weise die Masse eines jeden Teilchens mit dem Quadrat der Zahl, welche seine Entfernung von der Drehungsachse angibt, und summirt alle diese Werte, so findet man diejenige Masse, welche, in der Entfernung 1 von der Achse angebracht, die wirkliche Masse des Körpers ersetzen kann, ohne daſs die Drehung des ganzen Körpers dadurch eine Änderung erleidet. Man nennt die so berechnete Summe ($\Sigma m r^2$) das Trägheitsmoment des Körpers; durch die Kenntnis des Trägheitsmoments, welches auch durch Versuche ermittelt werden kann, vereinfacht sich die Betrachtung der Drehungsbewegungen auſserordentlich, weil man ja statt der unzähligen rings um die Achse in verschiedenen Entfernungen verteilten Massenteilchen nur noch eine in einem einzigen Punkt konzentrirt zu denkende oder auch längs eines Kreises vom Radius 1 gleichmäſsig verteilte Masse ins Auge zu fassen hat. Die Wucht eines sich um eine Achse drehenden Körpers ist hienach gleich dem halben Produkt des Trägheitsmoments mit dem Quadrat der Winkelgeschwindigkeit.

40. **Pendel.** Ein an möglichst dünnem Faden aufgehängter kleiner schwerer Körper bildet ein einfaches Pendel. Denkt man sich den Faden gewichtslos und den Körper als ein einziges Massenteilchen, so nennt man das Pendel ein mathematisches. Entfernt man das Pendel aus seiner lotrechten Gleichgewichtslage ($OA$, Fig. 43) und überläſst es dann sich selbst, so kehrt es unter der Einwirkung der Schwerkraft dahin zurück, indem es längs des Kreisbogens ($BA$) mit zunehmender Geschwindigkeit herabsinkt; in der Gleichgewichtslage

angekommen, geht es infolge der Trägheit mit der erlangten, der Falltiefe $FA$ entsprechenden Geschwindigkeit (vgl. das unter 21 Gesagte) über dieselbe hinaus, indem es mit abnehmender Geschwindigkeit einen gleichgrofsen Bogen ($AB'$) hinansteigt, in dessen höchstem Punkte ($B'$) seine Geschwindigkeit durch die entgegenwirkende Schwerkraft erschöpft ist. Die Bewegung des Pendels von seinem äufsersten Punkte ($B$) diesseits bis zum äufsersten Punkte ($B'$) jenseits heifst eine Schwingung, der Winkel ($BOA$), den der Faden in seiner äufsersten Lage mit der Gleichgewichtslage bildet, die Schwingungsweite oder Amplitude. In einer zweiten Schwingung kehrt das Pendel auf demselben Weg in seine anfängliche Lage ($B$) wieder zurück und würde so in unaufhörlicher Wiederholung derselben Be-

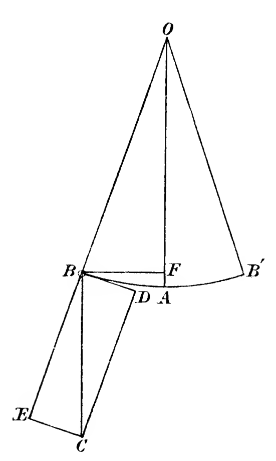


Fig. 43.
Pendel.

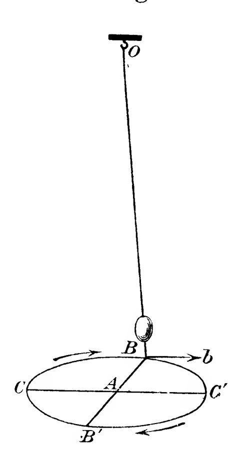


Fig. 44.
Kreisförmig schwingendes Pendel.

wegung mit gleichbleibender Schwingungsweite fortschwingen, wenn nicht äufsere Hindernisse, nämlich die Reibung am Aufhängepunkt und der Widerstand der Luft, die Amplitude immer kleiner machten und das Pendel endlich in der Gleichgewichtslage zur Ruhe brächten. Die Kraft, welche das Pendel in seine Gleichgewichtslage zurückzukehren nötigt, ist eine Komponente der Schwerkraft. Stellt nämlich in der Figur $BC = p$ den lotrecht abwärts wirkenden Zug des Pendelgewichtes vor, so kann man sich diese Kraft nach dem Parallelogramm der Kräfte in zwei zu einander senkrechte Seitenkräfte $BE$ und $BD$ zerlegt denken, von welchen erstere in die Richtung des Fadens, letztere in die Berührungslinie des Kreisbogens, also in die Richtung der Bewegung fällt, welche der Pendelkörper im Punkte $B$ besitzt; nur diese letztere kann Ursache der Bewegung sein, während jene keinen weiteren Erfolg hat, als den Faden gespannt zu erhalten. Zieht man nun $BF$ senkrecht zu $OA$, so folgt aus der Ähnlichkeit der Dreiecke $BCD$ und $BOF$, dafs sich die bewegende Kraft $BD$

zur ganzen Schwerkraft $BC$ verhält wie die Entfernung $BF = r$ zur Pendellänge $OB = l$, oder dafs

$$BD : p = r : l,$$

woraus folgt, dafs die bewegende Kraft

$$BD = \frac{p}{l} r$$

für ein und dasselbe Pendel der jeweiligen Entfernung des Pendelkörpers von der Gleichgewichtslage des Fadens proportional ist. Wenn die Schwingungsweiten nur klein sind, d. h. 2—3$^0$ nicht überschreiten, so ist der bogenförmige Weg $BA$, den der Pendelkörper von irgend einem Punkte seiner Bahn aus bis zur Gleichgewichtslage zurückzulegen hat, von der geradlinigen Strecke $BF$ nicht merklich verschieden; da alsdann die treibenden Kräfte in demselben Verhältnis stehen wie die zu durchlaufenden Wege, so leuchtet ein, dafs das Pendel bis zur Gleichgewichtslage dieselbe Zeit braucht, gleichviel ob seine Schwingungsweite 3$^0$ oder 2$^0$ oder nur wenige Bogenminuten oder -sekunden beträgt. Bei kleinen Schwingungsweiten sind also alle Schwingungen des Pendels von gleicher Dauer oder sie sind isochron. Der 20jährige Galilei entdeckte (1583) dieses Gesetz bei zufälliger Beobachtung einer im Dome zu Pisa an langer Kette aufgehängten Broncelampe; durch Zählung seiner Pulsschläge überzeugte er sich, dafs die Schwingungen, obgleich sie nach und nach immer kleiner wurden, doch immer die nämliche Dauer hatten. Auf diesem Gesetz des Isochronismus der Pendelschwingungen beruht die von Huygens (1657) eingeführte Anwendung des Pendels bei den Uhren, wo es die Aufgabe hat, die durch ein Gewicht oder eine Feder hervorgebrachte Bewegung des Räderwerkes nach gleichen Zeitabschnitten immer auf einen Augenblick zu hemmen und dadurch den sonst eintretenden ungleichförmigen Gang in einen gleichmäfsigen, oder vielmehr in einen nach gleichen Zeitabschnitten gehemmten, zu verwandeln.

Wir betrachten nun ein Pendel (Fig. 44), welches in der Ruhelage von $O$ nach $A$ herabhängt; bringt man den Pendelkörper nach $B$ und läfst ihn dann los, oder erteilt man ihm, während er sich in $A$ befindet, einen Stofs in der Richtung $AB$, so schwingt er in der Ebene $OBB'$ längs der Geraden $BB'$ hin und her; ebenso würde er längs jeder anderen durch $A$ gezogenen Geraden z. B. längs der zu $BB'$ Senkrechten $CC'$ schwingen, wenn man ihn in dieser Richtung anstiefse oder ihn nach $C$ oder $C'$ brächte und dann losliefse. Versetzt man nun den Pendelkörper in Schwingungen längs $BB'$ und erteilt ihm, sobald er seine äufserste Lage $B$ erreicht hat, in der zu $BA$ senkrechten Richtung $Bb$ einen Stofs, der ihn, falls er sich nur in dieser Richtung bewegen könnte, ebensoweit von $B$ nach seitwärts treiben würde, wie er im Augenblick des Stofses von der Gleichgewichtslage $A$ entfernt war, so beschreibt der Pendelkörper mit gleichförmiger Geschwindigkeit einen Kreis $BC'B'CB$ in

der Richtung der Pfeile. Man erkennt hieraus, dafs diese kreisförmige Bewegung als zusammengesetzt angesehen werden kann aus zwei gleichzeitig bestehenden zu einander senkrechten geradlinig schwingenden Bewegungen längs $BB'$ und längs $CC'$, und umgekehrt in diese beiden zerlegt gedacht werden kann. Die Umlaufszeit dieses konischen Pendels können wir leicht berechnen. Denn wir wissen (35), dafs für eine kreisförmige Bewegung die Centripetalkraft

$$C = \frac{4\pi^2 m r}{T^2}$$

ist, wenn $m$ die Masse des bewegten Körpers, $r$ den Radius der Kreisbahn und $T$ die Umlaufszeit bedeutet. Die Centripetalkraft, welche den Pendelkörper unausgesetzt gegen den Mittelpunkt $F$ der Kreisbahn (Fig. 45) hinzieht, ist aber nichts anderes als die Komponente $BD'$ der Schwerkraft, die wir erhalten, wenn wir uns über $BC$ als Diagonale ein Parallelogramm $BD'\ CE'$ konstruiren, dessen eine Seite in die Richtung des Fadens, dessen andere Seite in die Richtung des Kreisradius $BF$ fällt. Dann ist $BD'/p = BF/OF$ oder $BD' = p \cdot r/h$, wenn $p$ das Gewicht des Pendelkörpers, $h$ die Höhe $OF$ des Kegels und $r$ den Radius der Kreisbahn bedeutet. Ist $m$ die Masse des Pendelkörpers und $g$ die Beschleunigung des freien Falles, so hat man $p = mg$. Die auf das kreisförmig schwingende Pendel wirkende Centripetalkraft wird also auch ausgedrückt durch:

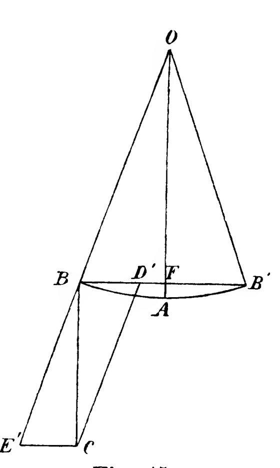


Fig. 45.
Konisches Pendel.

$$C = \frac{mg}{h} r.$$

Dieser Ausdruck mufs dem obigen gleich sein; man hat also:

$$\frac{mg}{h} r = \frac{4\pi^2 m r}{T^2}.$$

Aus dieser Gleichung fallen die beiderseits vorkommenden Faktoren $m$ und $r$ weg, und sie reduzirt sich auf:

$$\frac{g}{h} = \frac{4\pi^2}{T^2},$$

oder:

$$T^2 = 4\pi^2 \frac{h}{g},$$

oder, wenn man beiderseits die Quadratwurzel nimmt:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{h}{g}}.$$

Die Umlaufszeit des konischen Pendels ist also um so kleiner, je geringer die Höhe des Kegels, d. h. je weiter das Pendel aus seiner Ruhelage emporgehoben ist, wie man dies an einem Körper, den man an einem Faden im Kreise herumzuschwingen versucht, unmittelbar wahrnimmt. Ist die Abweichung des konischen Pendels aus seiner Ruhelage nur gering, so ist die Höhe $h$ nur sehr wenig von der Länge $l$ des Pendels verschieden. Andererseits ist in diesem Falle die Umlaufsdauer des konischen Pendels sehr nahe gleich der Zeit eines Hin- und Herganges des Pendels in geradliniger Schwingung. Man überzeugt sich davon leicht, indem man das kreisförmig schwingende Pendel mit einem (zu $CC'$) parallelen horizontalen Strahlenbündel beleuchtet. Dann macht sein Schattenbild auf einer zu $BB'$ parallelen vertikalen Wand genau dieselben Bewegungen, wie das längs $BB'$ geradlinig schwingende Pendel und vollendet einen Hin- und Hergang in derselben Zeit, wie jenes seinen vollständigen Umlauf. Die Schwingungsdauer des in vertikaler Ebene (geradlinig) schwingenden Pendels, d. i. die für einen Hin- oder Hergang erforderliche Zeit, ist aber nur die Hälfte dieser Umlaufszeit. Die Schwingungsdauer $t$ des Pendels (für hinreichend kleine Amplituden) ist also ausgedrückt durch:

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

In dieser Gleichung (wo $\pi$ die Ludolfsche Zahl 3,14159 . . . bedeutet) sind alle Gesetze der Pendelschwingungen enthalten. Das Gesetz des Isochronismus spricht sich schon dadurch aus, dafs $t$ von der Schwingungsweite unabhängig ist, indem sich $r$ bei der obigen Rechnung weghob. Auch von der Masse (oder dem Gewicht) des Pendelkörpers ist die Schwingungsdauer unabhängig, da auch $m$ aus der Rechnung hinausfiel. In der That fand Newton, dafs die Schwingungsdauer eines Pendels, dessen Pendelkörper, damit er immer den gleichen Luftwiderstand erfahre, aus einer Büchse bestand, in welche verschiedene Substanzen gebracht wurden, stets genau die nämliche blieb. Daraus folgt, dafs alle Körper, welches auch ihr Gewicht sein mag und aus welchem Stoffe sie bestehen mögen, durch die Schwerkraft die gleiche Beschleunigung erfahren, oder dafs alle Körper gleich schnell fallen. Der mittels des Pendels geführte Beweis für diesen Satz ist weit genauer als die früher zu diesem Zweck angeführten Versuche. Denn da ein Pendel trotz des Luftwiderstandes einige Tausend Schwingungen ausführen kann, ehe es zur Ruhe kommt, und alle diese Schwingungen, die anfänglichen von gröfserer wie die späteren von kleinerer Schwingungsweite, von gleicher Dauer sind, so kann man, indem man die in bestimmter Zeit stattfindenden Schwingungen zählt, die Schwingungsdauer mit grofser Genauigkeit ermitteln.

Unsere Formel sagt uns weiter, dafs 1) die Schwingungsdauer proportional der Quadratwurzel aus der Pendel-

länge und 2) umgekehrt proportional der Quadratwurzel aus der Beschleunigung der Schwere ist. Ersteres Gesetz wurde bereits von Galilei durch Beobachtungen an ungleich langen Fadenpendeln gefunden. Das letztere Gesetz kann man nachweisen durch ein starres Stangenpendel, das man in einer zur Vertikalebene unter dem Winkel $\alpha$ geneigten Ebene um eine zu letzterer senkrechte Achse schwingen läſst (Mach). Es schwingt jetzt langsamer, als bei vertikaler Lage der Schwingungsebene, weil statt der Beschleunigung $g$ nur noch die Komponente $g \cos \alpha$ wirkt, und seine Schwingungsdauer erweist sich im Verhältnis von $1 : \sqrt{\cos \alpha}$ vergröſsert.

Unter Schwingungszahl ($n$) eines Pendels versteht man die Anzahl der in 1 sec erfolgenden Schwingungen; sie ist $n = 1/t$ oder $n = \sqrt{g}/\pi\sqrt{l}$. Läſst man ein und dasselbe Pendel unter der Einwirkung zweier verschiedener Beschleunigungen $g$ und $g'$ schwingen, so verhalten sich hienach die Schwingungszahlen $n$ und $n'$ wie die Quadratwurzeln aus den Beschleunigungen, oder die Beschleunigungen verhalten sich wie die Quadrate der Schwingungszahlen:

$$g : g' = n^2 : n'^2.$$

41. **Sekundenpendel. Bestimmung von** $g$. Ein Pendel, dessen Schwingungsdauer eine Sekunde beträgt, heiſst Sekundenpendel. Bezeichnet man die Länge des mathematischen Sekundenpendels mit $l_1$, so ergibt sich vermöge obiger Formel, da jetzt $t = 1$ ist:

$$1 = \pi \sqrt{\frac{l_1}{g}}, \quad \text{oder} \quad 1 = \pi^2 \frac{l_1}{g}$$

und daraus

$$g = \pi^2 l_1.$$

Man findet also die Beschleunigung der Schwere, wenn man die Länge des Sekundenpendels mit dem Quadrate der Zahl $\pi$ multiplizirt. Da die Länge des Sekundenpendels sehr genau gemessen werden kann, so ist dieses Verfahren das genaueste zur Ermittelung von $g$. Borda fand für die Länge des Sekundenpendels in Paris 99,392 cm; daraus ergibt sich die Fallbeschleunigung $g = 980{,}95$ cm sec$^{-2}$.

Als 1672 der französische Astronom Richer in Cayenne, fünf Breitengrade nördlich vom Äquator, Beobachtungen anstellte, bemerkte er, daſs seine von Paris mitgebrachte Pendeluhr um $2\frac{1}{2}$ Minuten täglich nachging; damit die Uhr wieder richtig ging, muſste er das Sekundenpendel um einige Millimeter verkürzen; nach Paris zurückgebracht, ging sie nun $2\frac{1}{2}$ Minuten vor. Wenn aber ein und dasselbe Pendel in Cayenne langsamer schwingt als in Paris, so kann dies keine andere Ursache haben, als daſs die Schwerkraft dort schwächer wirkt als hier, so daſs dort auch ein frei fallender Körper eine kleinere Beschleunigung erfährt als hier.

Man hat nun, indem man die Länge des Sekundenpendels an

den verschiedenen Orten der Erdoberfläche bestimmte, gefunden, dafs diese Länge von dem Äquator nach den Polen hin zunimmt; am Äquator nämlich ist das Sekundenpendel 99,092 cm, unter 45° Breite 99,355 cm, in Berlin 99,424 cm lang, und am Pol würde es, wie man aus den übrigen Beobachtungen schliefsen mufs, 99,613 cm lang sein. Daraus folgt, dafs in gleichem Mafs auch die Beschleunigung der Schwere vom Äquator nach den Polen hin zunimmt. Nach der Formel $g = \pi^2 l_1$ findet man die Beschleunigung der Schwere am Äquator 978,00 unter 45° Breite 980,60, in Paris 980,95, in Berlin 981,28, am Pol 983,19 ($\mathrm{cm\ sec}^{-2}$).

42. **Foucaultsches Pendel.** Ein schwingendes Pendel hat vermöge der Trägheit das Bestreben, in seiner Schwingungsebene zu verharren, ähnlich wie ein rotirender Kreisel seine Drehungsebene zu bewahren strebt. Hängt man ein Pendel innerhalb eines auf die Centrifugalmaschine gesetzten Rahmens auf, so behält seine Schwingungsebene ihre Richtung im Raume bei, wenn man den Rahmen langsam um seine vertikale Achse dreht. Auch der Umdrehung der Erde gegenüber hält ein Pendel seine Schwingungsebene fest (Foucault, 1851).

Denkt man sich ein Pendel über dem Nordpol der Erde aufgehängt, so behält die Schwingungsebene des Pendels ihre Richtung im Raume bei, während die Erde samt dem auf ihr stehenden Beobachter sich unter dem Pendel von West nach Ost dreht; der Beobachter, der seinen Standpunkt für fest hält, wird daher die Schwingungsrichtung des Pendels in Bezug auf die Erdoberfläche von Ost über Süd nach West, also nach rechts hin, sich drehen und in 24 Stunden einen ganzen Umlauf vollenden sehen. An jedem anderen Ort kann die Bewegung der Erdoberfläche aufgefafst werden als zusammengesetzt aus einer langsameren Drehung um eine lotrechte Achse und aus einer Fortführung von West nach Ost; nur die erstere Bewegung kann zu einer scheinbaren Drehung der Schwingungsrichtung des Pendels, auf der nördlichen Erdhälfte nach rechts, auf der südlichen nach links herum, Anlafs geben, welche um so langsamer erfolgt, je näher der Ort dem Äquator liegt, und am Äquator selbst gar nicht eintritt.

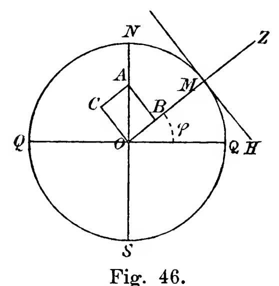


Fig. 46.
Zum Foucaultschen Pendelversuch.

Stellt nämlich der Kreis $NQS$ (Fig. 46) den durch den Ort $M$ der Erdoberfläche, dessen geographische Breite $MOQ = \varphi$ ist, gezogenen Meridian vor, so kann man die Umdrehungsgeschwindigkeit (15° pro Stunde) der Erde um ihre Achse $NS$ durch die auf der Achse von $O$ aus aufgetragene Strecke $OA$ darstellen, und dieselbe nach der Regel des Parallelogramms zerlegen (26) in eine Drehung $OB$ um die vertikale Achse $OMZ$ des Beobachtungsortes und in eine Drehung $OC$ um die zum Horizont $MH$ parallele Achse $OC$. Die erstere allein wirksame Komponente beträgt $OB \sin\varphi$ oder per Stunde $15^0 \sin\varphi$, d. h. die Geschwindigkeit der scheinbaren Drehung der Pendelebene ist dem Sinus der

geographischen Breite proportional; die Dauer einer ganzen Umdrehung ist diesem Sinus umgekehrt proportional und beträgt 24 : sin $\varphi$ Stunden.

In München z. B. braucht die Schwingungsebene des Pendels zu einer ganzen Umdrehung 32 Stunden 13 Minuten, in Berlin $30^h$ 15′.

Zu diesem berühmt gewordenen Foucaultschen Pendelversuch, welcher die Umdrehung der Erde um ihre Achse unmittelbar zur Anschauung bringt, muſs man ein Pendel von groſser Trägheit wählen, welches, einmal in Bewegung gesetzt, lange Zeit fortschwingt, nämlich ein schweres Bleigewicht, an langem Draht in einem hohen Raume aufgehängt.

43. **Physisches Pendel.** Das unseren bisherigen Betrachtungen zu Grund gelegte einfache oder mathematische Pendel, welches aus einem einzigen an gewichtslosem Faden aufgehängten Massenpunkt bestehen soll, läſst sich in Wirklichkeit nicht herstellen; jedes wirklich ausgeführte Pendel ist ein sogenanntes physisches oder zusammengesetztes Pendel und besteht aus unzählig vielen Massenteilchen, welche sich in verschiedenen Entfernungen vom Aufhängungspunkte befinden, also gleichsam aus unzählig vielen einfachen Pendeln von verschiedener Länge. Da jedes Massenteilchen des Pendels um so schneller zu schwingen bestrebt ist, je näher es dem Aufhängungspunkte liegt, und da doch alle Teilchen durch ihren festen Zusammenhang gezwungen sind, gleichzeitig zu schwingen, so werden die dem Aufhängungspunkt näher gelegenen Teilchen in ihrer Bewegung durch die entfernteren verzögert, die entfernter gelegenen aber durch die näheren beschleunigt. Ein dazwischenliegender Punkt, dessen Bewegung weder verzögert, noch beschleunigt wird, der vielmehr genau so schwingt, wie es seine Entfernung vom Aufhängungspunkt fordert, heiſst der Schwingungspunkt, und sein Abstand vom Aufhängungspunkt, die reduzirte Pendellänge, gibt die Länge des mathematischen Pendels an, welches dieselbe Schwingungsdauer hat wie das gegebene physische. Für das physische Pendel gelten, wenn man unter der Länge desselben die reduzirte Pendellänge versteht, dieselben Schwingungsgesetze wie für das mathematische.

Vertauscht man bei einem physischen Pendel den Schwingungspunkt mit dem Aufhängungspunkt, so schwingt es in beiden Lagen gleich schnell. Mit Hilfe dieser Thatsache läſst sich die reduzirte Pendellänge leicht bestimmen; man bedient sich hierzu des Umkehrungs- oder Reversionspendels (Huygens, 1673), an dessen Stange sich auſser der gewöhnlichen stählernen Aufhängungsschneide noch eine zweite verschiebbare mit entgegengesetzter Kante befindet; letztere wird durch Probiren in die Lage gebracht, daſs das Pendel an ihr hängend genau so viel Zeit zu einer Schwingung braucht wie vorher, als es an der ersten Schneide hing. Die reduzirte Pendellänge ist dann gleich dem Abstand der beiden Aufhängungsschneiden. Durch dieses Verfahren sind die oben angeführten genauen Werte der Länge des Sekundenpendels bestimmt worden (Kater, 1818, Bessel, 1828).

Ein physisches Pendel (d. i. ein beliebig gestalteter, um eine horizontale Achse drehbarer schwerer Körper), welches mit der Winkelgeschwindigkeit $\omega$ in seiner Gleichgewichtslage anlangt, besitzt daselbst die Wucht $^1/_2\,\omega^2 \sum m r^2$, wo $\sum m r^2$ das Trägheitsmoment des Körpers in Bezug auf die Drehungsachse bedeutet. Bezeichnet $h$ die vertikale Senkung des in der Entfernung 1 von der Drehungsachse gelegenen Punktes und $s$ die Entfernung des Schwerpunktes von dieser Achse, so ist $hs$ die Falltiefe des Schwerpunktes, und $hsg\sum m$ die Fallarbeit, welche das im Schwerpunkt angreifende Gesamtgewicht $g\sum m$ des Körpers leisten mufste, um jene Wucht zu erzeugen. Man hat daher

$$hsg\sum m = {}^1/_2\,\omega^2 \sum m r^2.$$

Für ein einfaches Pendel von derselben Schwingungsdauer und Amplitude, dessen Länge $l$ und dessen Masse $\mu$ ist, welches, nachdem sich dessen einziger Massenpunkt $\mu$ um $hl$ gesenkt hat, mit der Geschwindigkeit $l\omega$ in der Gleichgewichtslage anlangt, gilt aber dieselbe Beziehung (Fallarbeit gleich Wucht), nämlich

$$hlg\mu = {}^1/_2\,\omega^2 \mu l^2 \text{ oder } hg = {}^1/_2\,\omega^2 l.$$

Setzt man diesen Wert von $gh$ in die obige Gleichung ein, so ergibt sich die reduzirte Pendellänge

$$l = \frac{\sum m r^2}{s \sum m},$$

oder, weil (für eine gerade Stange) $s\sum m = \sum m r$ ist (28)

$$l = \frac{\sum m r^2}{\sum m r}.$$

Nehmen wir z. B. an, wir hätten an einer gewichtslosen Stange zwei Massen, $m_1$ und $m_2$, $m_1$ in dem festen Abstand $r_1$ unterhalb des Aufhängepunktes, $m_2$ aber oberhalb des Aufhängepunktes an der nach oben verlängerten Stange verschiebbar. Ihr Abstand vom Aufhängepunkte ist $r_2$ und mufs gegen $r_1$ negativ genommen werden. Dann ist die reduzirte Pendellänge des Systems:

Fig. 47. Reversionspendel.

$$l = \frac{m_1 r_1^2 + m_2 r_2^2}{m_1 r_1 - m_2 r_2}.$$

Ist $r_2$ sehr klein, d. h. befindet sich $m_2$ dicht am Aufhängepunkt, so ist $l = r_1$. Schiebt man $m_2$ in die Höhe, so wird der Nenner immer kleiner und $l$ immer gröfser. Je höher $m_2$ hinaufgeschoben wird, um so gröfser ist die Schwingungsdauer des Systems. Darauf beruht das Metronom.

Kehrt man das Pendel um und macht den Schwingungspunkt $S$ (Fig. 47) zum Aufhängepunkt, so ist die neue Pendellänge $l'$, da nun $r' = l - r$ statt $r$ zu setzen ist:

$$l' = \frac{\sum m (l-r)^2}{\sum m (l-r)} = \frac{l^2 \sum m - 2l \sum m r + \sum m r^2}{l \sum m - \sum m r}$$

oder, da $\sum m r^2 = l \sum m r$ ist

$$l' = \frac{l^2 \sum m - l \sum m r}{l \sum m - \sum m r} = \frac{l(l \sum m - \sum m r)}{l \sum m - \sum m r} = l,$$

d. h. die reduzirte Pendellänge und damit die Schwingungsdauer ist bei der neuen Aufhängung die nämliche.

44. **Keplers Gesetze der Planetenbewegung.** Grofsartige Beispiele von Centralbewegung bieten uns die Planeten dar; die sog. grofsen Planeten sind, nach der Reihenfolge ihrer Entfernungen von der Sonne: Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun. Kepler entdeckte (1609 und 1618), gestützt auf die Be-

obachtungen von Tycho Brahe am Planeten Mars, für die Bewegung der Planeten um die Sonne folgende Gesetze: 1) Die Planetenbahnen sind Ellipsen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht. 2) Der Leitstrahl eines Planeten durchstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächenräume. 3) Die Quadrate der Umlaufszeiten zweier Planeten verhalten sich wie die Würfel ihrer (mittleren) Entfernungen von der Sonne. Die Abweichung der elliptischen Bahnen von der Kreisform ist übrigens so gering, dafs man dieselben annähernd als Kreise, in deren Mittelpunkt die Sonne steht, ansehen kann.

45. **Allgemeine Gravitation.** Aus dem zweiten Keplerschen Gesetz folgt vermöge des Flächensatzes (34), dafs die Planetenbewegung durch eine Centripetalkraft bestimmt wird, die stets nach der Sonne gerichtet ist.

Da die Planetenbahnen mit sehr grofser Annäherung als Kreise angesehen werden können, so müssen sich die Centripetalkräfte ($C$ und $C'$) zweier Planeten nach den Gesetzen der Centralbewegung (35) verhalten wie ihre Massen ($m$ und $m'$) und wie die Halbmesser ($r$ und $r'$) ihrer Bahnen (d. h. wie ihre Entfernungen von der Sonne) und umgekehrt wie die Quadrate ihrer Umlaufszeiten ($T$ und $T'$). Man hat also:

$$C : C' = \frac{m\,r}{T^2} : \frac{m'\,r'}{T'^2}.$$

Da aber nach dem dritten Keplerschen Gesetz die Quadrate der Umlaufszeiten sich verhalten wie die Würfel der Entfernungen, oder da $T^2 : T'^2 := r^3 : r'^3$, so folgt:

$$C : C' = \frac{m}{r^2} : \frac{m'}{r'^2},$$

d. h. die Centripetalkräfte verhalten sich wie die Massen und umgekehrt wie die Quadrate der Entfernungen von der Sonne, oder jeder Planet wird von der Sonne mit einer Kraft angezogen, welche im geraden Verhältnis zu seiner Masse und im umgekehrten Verhältnis zum Quadrat seiner Entfernung steht (Newton, 1686).

Aber nicht nur der Planet von der Masse $m$ wird gegen die Sonne gezogen, sondern mit der gleichen Kraft (denn es gibt ja keine Wirkung ohne gleiche Gegenwirkung) auch die Sonne von der Masse $M$ gegen den Planeten. Der zwischen den beiden Körpern in der Richtung ihrer Verbindungslinie ausgeübte Zug mufs daher auch der Masse $M$ proportional sein. Nachdem Newton für die Körper des Planetensystems dieses Gesetz erkannt hatte, drängte sich ihm die Vermutung auf, dafs diese gegenseitige Wirkung nur eine besondere Äufserung einer allgemeinen Eigenschaft des Stoffes, der Gravitation oder allgemeinen Massenanziehung sei, welche sich dadurch kundgibt, dafs zwei Massen $m$ und $M$ in der Entfernung $r$ sich mit einer Kraft

$$f \cdot \frac{m\,M}{r^2}$$

anziehen, welche dem Produkte der Massen direkt, dem Quadrate ihrer Entfernung umgekehrt proportional ist. Der für alle Massen unveränderliche, aus Beobachtungen zu ermittelnde Faktor $f$ heifst die Gravitationskonstante.

Durch einen fallenden Apfel, so erzählt man, wurde Newton auf den Gedanken gebracht, dafs die Schwere nichts anderes sei, als die von dem Erdkörper ausgeübte Massenanziehung und sich nicht blofs an der Erdoberfläche durch den Fall der Körper äufsere, sondern sich mit abnehmender Stärke bis zum Mond und darüber hinaus erstrecke und letzteren zwinge, die Erde zu umkreisen, gerade wie die Planeten durch die Anziehungskraft der Sonne in ihren Bahnen erhalten werden. Aus astronomischen Beobachtungen weifs man, dafs der Mond, welcher vermöge der Trägheit in jedem Augenblick bestrebt ist, längs der Berührungslinie seiner Bahn geradeaus zu gehen, in jeder Sekunde gegen die Erde hin eine Beschleunigung von 0,271 cm erfährt. Ist nun diese Beschleunigung eine Äufserung der Schwerkraft, welche einem fallenden Körper am Äquator der Erde eine Beschleunigung von 978 cm erteilt, so mufs sich die Mondbeschleunigung nach obigem Gesetz aus der Fallbeschleunigung berechnen lassen. Da die Entfernung des Mondes von der Erde 60 Erdhalbmesser beträgt, derselbe also 60 mal weiter von dem Erdmittelpunkt entfernt ist als ein Punkt des Äquators, so müfste die Mondbeschleunigung $60 \times 60$ oder 3600 mal kleiner sein als die Beschleunigung eines an der Erdoberfläche fallenden Körpers, also $978 : 3600 = 0{,}271$ cm. Durch die vollkommene Übereinstimmung dieses Wertes mit dem aus den astronomischen Beobachtungen abgeleiteten ist aber der sichere Beweis geführt, dafs die Schwerkraft und die allgemeine Anziehungskraft, welche den Weltkörpern ihre Bewegungen vorschreibt, ein und dasselbe sind.

Die Anziehung, welche ein Körper auf irgend ein Massenteilchen ausübt, entspringt aus dem Zusammenwirken aller von den einzelnen Massenteilchen des Körpers ausgehenden Einzelkräfte. Ist der Körper eine gleichartige oder aus gleichartigen koncentrischen Schalen gebildete Kugel, so ist die auf ein aufserhalb befindliches Teilchen ausgeübte Gesamtanziehung offenbar nach dem Mittelpunkt der Kugel gerichtet und erfolgt gerade so (wie bei einer späteren Gelegenheit gezeigt werden wird), als wäre die ganze Masse der Kugel in ihrem Mittelpunkt zusammengedrängt. Deshalb ist der Mittelpunkt der Erde gleichsam als Sitz der Anziehungskraft anzusehen, von welchem aus die Entfernungen zu rechnen sind, wie vorhin bei Berechnung der auf den Mond ausgeübten Wirkung geschehen ist. Eine Hohlkugel übt auf einen auf ihrer inneren Oberfläche oder im Hohlraum gelegenen Punkt gar keine Wirkung aus, weil die diesseits und jenseits des Punktes gelegenen Teile der Kugelschale mit gleicher Kraft nach entgegengesetzten Richtungen ziehen. Ein Punkt im Innern der Erde, z. B. auf der Sohle eines Bergwerkes, erfährt daher von allen Teilen des Erdkörpers, welche weiter als er selbst vom

Mittelpunkt abstehen, keine Einwirkung mehr und wird nur noch von dem unter ihm befindlichen Erdkern nach dem Mittelpunkt gezogen.

Bestände die Erde aus durchaus gleichartigem Stoff, so müfste hiernach in der Tiefe eines Schachtes die Fallbeschleunigung geringer und die Schwingungsdauer eines Pendels gröfser sein (Drobisch, 1826). Airy fand dagegen (1856) durch Pendelbeobachtungen, welche er einerseits an der Erdoberfläche, andererseits auf dem Boden des Bergwerkes von Harton in einer Tiefe von 383 m anstellte, in der Tiefe die Beschleunigung gröfser als an der Oberfläche, woraus geschlossen werden mufs, dafs das Erdinnere aus spezifisch schwererem Stoff besteht als die uns zugängliche Erdrinde.

Aus Pendelbeobachtungen ergab sich, dafs an der Erdoberfläche die Schwerkraft von den Polen gegen den Äquator hin abnimmt. Fragt man nach der Ursache der Erscheinung, so wird man zunächst an die Centrifugalkraft zu denken haben, welche aus dem Umschwung der Erde um ihre Achse entspringt; da die Umdrehungsgeschwindigkeit und der Halbmesser der Erde bekannt sind, so läfst sich die Gröfse der Centrifugalkraft leicht berechnen; man findet, dafs sie am Äquator, wo sie der Schwerkraft gerade entgegenwirkt, $^1/_{289}$ derselben ausmacht, und dafs infolgedessen die Beschleunigung dort um 34 mm kleiner sein müfste als an den Polen. Die Pendelbeobachtungen aber zeigen, dafs die Abnahme der Beschleunigung von den Polen nach dem Äquator in Wirklichkeit gröfser ist und mehr als 51 mm beträgt. Es mufs demnach für diese Verminderung noch eine andere Ursache vorhanden sein, welche nur darin bestehen kann, dafs die Pole dem Erdmittelpunkt näher liegen als die Punkte des Äquators, oder dafs die Erde nicht genau kugelförmig, sondern wie eine Orange an den Polen abgeplattet ist. Aus den mittels des Pendels gefundenen Werten der Beschleunigung und aus der Gröfse der Centrifugalkraft kann man nun die Abplattung der Erde berechnen und findet sie gleich $^1/_{293}$; diese Zahl, welche aussagt, dafs der Erddurchmesser von Pol zu Pol um den 293. Teil kürzer ist als der Durchmesser des Äquators, stimmt mit dem aus Gradmessungen gefundenen Werte $^1/_{299}$ sehr nahe überein.

Die Anziehung zwischen zwei Massen ist, wie bereits bemerkt, eine gegenseitige. Mit derselben Kraft, mit welcher ein Stein abwärts gegen die Erde gezogen wird, wird auch die Erde gegen den Stein nach aufwärts gezogen. Da aber bei gleichen Kräften die Beschleunigungen sich umgekehrt verhalten wie die zu bewegenden Massen, so wird die Beschleunigung, welche die ungeheuer grofse Masse der Erde durch die dem Gewicht des Steines gleiche Kraft erfährt, nur verschwindend klein sein können.

Wenn aber jeder Körper den anderen anzieht, warum wird man nicht, wenn man an einem Haus vorübergeht, nach dem Haus hingezogen? Die Antwort auf diese Frage lautet: man wird in der That nach dem Haus hingezogen, die Wirkung ist aber im Vergleich zu der Anziehung der ungeheuren Erdmasse so geringfügig, dafs sie

unserer Wahrnehmung entgeht. Dennoch kann man durch hinreichend empfindliche Hilfsmittel die Anziehung, welche z. B. eine grofse Bleikugel auf eine kleinere ausübt, nachweisen und sogar messen, wie Cavendish (1798), Reich (1852), Baily (1842), Cornu und Baille (1870—78) (mittels der Drehwage) gethan haben. Das Ergebnis dieser Untersuchungen kann man sich folgendermafsen veranschaulichen: Drückt man die Kraft in Dynen aus, so ist die Anziehung zweier Massen von je 1 g in 1 cm Entfernung ungefähr $6{,}69 \times 10^{-8}$ Dynen. Denkt man sich daher zwei Massen von je 1 kg in je einem Punkte vereinigt und diese beiden Punkte in 1 cm Entfernung voneinander, so würde die anziehende Kraft zwischen ihnen ungefähr so grofs sein, wie das Gewicht von 0,07 mg.

Kennt man so die Anziehungskraft, mit welcher z. B. eine bekannte Bleimasse in bekannter Entfernung auf eine Metallkugel einwirkt, und vergleicht man sie mit der Anziehungskraft, welche dieselbe Metallkugel von seiten der Erde erleidet, d. h. mit ihrem Gewicht, so kann man daraus mit Rücksicht auf die Entfernungen der Anziehungsmittelpunkte auf die Gröfse der Erdmasse schliefsen; aus den Messungen der obengenannten Physiker ergibt sich übereinstimmend, dafs die Masse der Erde $5^1/_2$ mal so grofs ist als diejenige einer gleichgrofsen Wasserkugel. Maskelyne (1775) hat ferner gezeigt, dafs zur Seite einer freistehenden Bergkette das Bleilot von dieser angezogen und daher aus der lotrechten Richtung abgelenkt wird, natürlich um einen sehr geringfügigen, aber mit feinen Libellen (s. u. 59) mefsbaren Betrag. Aus der Gröfse dieser Ablenkung und dem durch Schätzung ermittelten Gewicht des Berges konnte ebenfalls die Masse der Erde, nahe übereinstimmend mit der obigen Zahl, gefunden werden. In neuerer Zeit (1880) hat Jolly mittels der Wage die Anziehung bestimmt, welche eine Bleikugel von etwa 1 m Durchmesser auf eine Quecksilbermasse ausübt, und daraus das Gewicht des Erdkörpers ermittelt. Nach derselben Methode in verfeinerter Ausführung haben für die mittlere Dichtigkeit der Erde bezogen auf Wasser gefunden Poynting (1891) 5,493, Richarz und Krigar-Menzel (1896) 5,505. Auch die vom Gravitationsgesetz geforderte Abnahme der Schwere nach dem Quadrat der Entfernung vom Erdmittelpunkt ist mittels der Wage nachzuweisen. Es mufs nämlich von zwei Kilogrammstücken, welche an den Armen des Wagebalkens in verschiedener Höhe aufgehängt sind, das tiefer hängende, weil es dem Erdmittelpunkt näher ist, schwerer erscheinen. Es ergab sich in der That, dafs bei einem Höhenunterschied von 5,2 m das tiefer hängende Gewicht 1,5 mg schwerer war. Dieser Wert ist um 0,152 mg kleiner als der aus dem Gravitationsgesetz berechnete; die Abweichung erklärt sich aber zur Genüge aus der störenden Anziehung der umgebenden Gebäude.

46. **Ebbe und Flut.** Dafs die periodische Wiederkehr von Ebbe und Flut mit der Mondperiode im Zusammenhang steht, wurde schon

frühzeitig erkannt. Newton erklärte die Erscheinung aus dem Gravitationsgesetz. Der Mond *M* (Fig. 48) zieht die ihm zugewendeten Wasserteile *A* des die Erde umgebenden Ozeans stärker an als den von ihm entfernten Erdmittelpunkt *C*, und diesen wiederum stärker als die Wasserteile *B* der abgewendeten Seite. Indem Erde und Mond sich gegeneinander bewegen, was ja in der That beim Durchlaufen ihrer Bahnen in jedem Augenblick geschieht, wird das bewegliche Wasser in *A* dem starren Erdkörper vorauseilen, das Wasser in *B* hinter ihm zurückbleiben. Die Folge davon ist, dafs der Druck des Wassers gegen die Erde hin sowohl in *A* wie in *B* eine Verminderung erleidet, und das Wasser sowohl an der dem Mond zugekehrten als auch an der von ihm abgekehrten Seite steigt (Flut), an den um 90° davon entfernten Punkten aber sinkt (Ebbe). Während der 24stündigen Umdrehung der Erde um ihre Achse umkreist jene Anschwellung nebst Senkung (die Flutwelle) den ganzen Erdball, und bringt an jedem am Meere gelegenen Ort täglich ein zweimaliges Steigen und Sinken des Wasserspiegels hervor. Nicht nur der Mond, sondern auch die Sonne giebt zu einer Flutwelle Anlafs, die jedoch trotz der viel gröfseren Masse der Sonne wegen ihrer gröfseren Entfernung schwächer ist als die vom Mond bewirkte. Bei Voll- und Neumond, wenn beide Gestirne in derselben Geraden *MC* stehen, addiren sich ihre Wirkungen und erzeugen die höchsten Fluten, Springfluten; zur Zeit der Viertel, wenn Sonne und Mond um 90° voneinander abstehen, fällt Mondflut und Sonnenebbe zusammen, und es entstehen die niedrigsten Fluten, Nippfluten; diese Abwechselung in der Fluthöhe tritt in jedem Monat zweimal ein. Dieser regelmäfsige Verlauf der Erscheinungen, welcher stattfinden würde, wenn die ganze Erdoberfläche vom Ozean bedeckt wäre, erleidet übrigens durch die Gestaltung der Kontinente mancherlei Abänderungen.

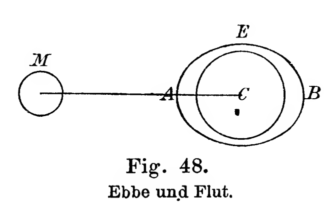


Fig. 48.
Ebbe und Flut.

# II. Feste Körper.

---

47. **Allgemeine Eigenschaften der Körper.** Bei den vorausgehenden Betrachtungen der Bewegung und des Gleichgewichts wurde angenommen, daſs die festen Körper vollkommen *starr* seien, d. h. daſs die Punkte eines Körpers derart unveränderlich miteinander verbunden seien, daſs entgegengesetzt gleiche Kräfte, die zwei Punkte eines Körpers voneinander oder gegeneinander zu treiben streben, weder eine Verlängerung noch eine Verkürzung der Verbindungslinie bewirken, sondern nur, wie groſs auch die angreifenden Kräfte sein mögen, eine ihnen gleiche Gegenwirkung hervorrufen. Bei einem wirklichen festen Körper tritt aber eine solche Entfernungsänderung seiner Punkte thatsächlich ein; durch einen Zug wird der Rauminhalt eines Körpers vergröſsert, durch Druck vermindert, und zwar um so mehr, je gröſser die einwirkenden Kräfte sind. Der Körper widerstrebt jedoch dieser Volumenänderung mit einer Kraft, welche der formändernden Kraft das Gleichgewicht hält, und kehrt zu einer früheren Form völlig oder teilweise wieder zurück, sobald die angreifende Kraft aufgehört hat zu wirken, falls die Gröſse dieser Kraft eine gewisse Grenze nicht überschreitet. Eine gröſsere Kraft aber bewirkt eine Trennung der Körperteile, der Körper zerreiſst oder zerbricht.

Da alle Körper durch Zug oder Druck (auch durch Erwärmung oder Abkühlung) eine Änderung ihres Rauminhaltes erleiden, so bezeichnet man diese *Veränderlichkeit des Volumens* als eine *allgemeine Eigenschaft* der Körper.

Die sogenannte *Undurchdringlichkeit*, welche man ebenfalls zu den allgemeinen Eigenschaften der Körper zählt, besagt nichts weiter, als daſs ein Körper dem von anderen Körpern auf ihn ausgeübten Druck einen Widerstand entgegensetzt, der mit der Verkleinerung seines Rauminhalts zunimmt, bis bei weiter wachsendem Druck Zertrümmerung (Ritzen, Zerschneiden u. s. w.) eintritt. Eine Säge durchschneidet einen Holzblock, indem sie die Holzmasse, in welche sie scheinbar eindringt, in Form von Sägespänen aus dem Wege räumt. Wasser und Luft werden von unserer Hand verdrängt, aber nicht durchdrungen.

Poröse Körper werden von Flüssigkeiten oder Gasen nur scheinbar durchdrungen, indem sie letztere in die gröſseren oder kleineren, häufig mikroskopisch kleinen Hohlräume oder *Poren* aufnehmen, oft in beträchtlicher Menge ohne merkliche Änderung ihres Volumens. Selbst Metalle lassen unter starkem Druck Wasser durch (Florentiner

Akademie, 1661) und sind daher porös. Glas dagegen ist für Flüssigkeiten und Gase undurchlässig und sonach nicht porös (Quincke). Die Porosität ist demnach, falls man unter Poren sinnlich wahrnehmbare Hohlräume versteht, keine allgemeine Eigenschaft der Körper.

Dagegen ist die Teilbarkeit, d. i. die Eigenschaft, dafs sich jeder Körper in kleinere Teile zerlegen läfst, eine allgemeine. Diese Zerlegung kann entweder mechanisch (durch Zerschneiden, Zerstofsen, Zerreifsen, Auswalzen, Ausziehen u. s. w.) oder durch das Spiel der Naturkräfte selbst (durch Auflösen, Verdampfen u. s. w.) bewirkt werden; in beiden Fällen geht die Teilbarkeit erfahrungsgemäfs so weit, dafs sich eine bestimmte Grenze nicht angeben läfst. Wollaston hat Platindrähte hergestellt von 0,0008 mm oder 0,8 $\mu$ (1 $\mu$ oder Mikron ist 0,001 mm) Dicke, von welchen 140 nebeneinander gelegt erst die Dicke eines Coconfadens ausmachen. Gold wird in Blättchen von 0,1 $\mu$ Dicke geschlagen, von welchen 10000 aufeinander gelegt werden müssen, um die Dicke von 1 mm zu geben. Die Goldschicht, welche die feinen Silberfäden der Lyoner Spitzen überzieht, hat eine Dicke von noch nicht 0,004 $\mu$. Ein hunderttausendstel Kubikcentimeter Fuchsin vermag noch ein Liter Alkohol merklich zu färben. Fünf Centigramm Moschus erfüllen ein Zimmer trotz häufigen Luftwechsels mehrere Jahre lang mit ihrem Geruch. Durch Gelbfärbung der Bunsenschen Flamme macht sich noch der dreimillionste Teil eines Milligramms Natrium erkennbar u. s. w.

48. **Atome. Moleküle.** Die Teilbarkeit der Körper geht sonach erfahrungsgemäfs bis an die Grenzen der sinnlichen Wahrnehmung, und die Teilung kann, mathematisch gesprochen, selbstverständlich bis ins Unendliche fortgesetzt gedacht werden. Dennoch ist die Frage berechtigt, ob die Materie auch wirklich bis ins Unendliche teilbar sei, oder vielmehr aus individuellen Teilchen bestehe, welche im physischen Sinne eine weitere Teilung nicht mehr zulassen, und in diesem Sinne als letzte und kleinste Bestandteile zu betrachten sind; oder mit anderen Worten, es fragt sich, ob wir uns die Materie vorstellen wollen als etwas, das den Raum stetig, ohne Unterbrechung, erfüllt, oder als ein Haufwerk voneinander durch Zwischenräume getrennter individueller kleiner Teilchen.

Wir stützen uns bei Erörterung dieser Frage auf Thatsachen, welche dem Gebiete der Chemie angehören.

Der Zinnober, das bekannte rote Farbmaterial, ist eine chemische Verbindung aus Quecksilber und Schwefel und kann leicht in diese beiden ungleichartigen Bestandteile zerlegt oder aus ihnen wieder zusammengesetzt werden. Dagegen können weder Schwefel noch Quecksilber durch die Mittel der heutigen Chemie in ungleichartige Bestandteile weiter zerlegt werden und sind daher auf dem gegenwärtigen Standpunkt unseres Wissens als einfache Stoffe (Grundstoffe, Elemente) anzusehen. Der Zinnober enthält stets auf je 100 Gewichtsteile Quecksilber 16 Gewichtsteile Schwefel. Nimmt man zu seiner Darstellung gerade 100 Teile Quecksilber und 16 Teile

Schwefel, so erhält man 116 Gewichtsteile Zinnober, ohne daſs weder vom Quecksilber noch vom Schwefel etwas übrig bleibt. Würde man dagegen auf 100 Teile Quecksilber 17 Teile Schwefel, oder auf 16 Teile Schwefel 101 Teile Quecksilber nehmen, so würden doch nur 116 Gewichtsteile Zinnober entstehen und im ersten Fall 1 Gewichtsteil Schwefel, im zweiten Fall 1 Gewichtsteil Quecksilber unverbunden übrig bleiben. Ebenso sind, um mit 100 Gewichtsteilen Quecksilber in chemische Verbindung zu treten, 8 Gewichtsteile Sauerstoff, 35,5 Chlor, 127 Jod etc. erforderlich. *Die Grundstoffe verbinden sich also miteinander nur nach bestimmten unabänderlichen Gewichtsverhälnissen.* Die Verbindung von 100 Gewichtsteilen Quecksilber mit 127 Gewichtsteilen Jod entsteht, wenn man die beiden Grundstoffe in diesem Verhältnis zusammenreibt, als rotes Pulver (Mercurijodid). Das Jod kann jedoch mit dem Quecksilber noch eine andere Verbindung bilden, das Mercurojodid, ein grünliches Pulver, das auf 127 Gewichtsteile Jod 200 Gewichtsteile Quecksilber enthält. Ebenso können 14 Gewichtsteile Stickstoff nicht nur mit 8, sondern auch mit 16 oder 24 oder 32 oder 40 Gewichtsteilen Sauerstoff sich verbinden. Es ergibt sich also, daſs, wenn ein Grundstoff mit einem anderen sich in mehr als einem Verhältnis zu vereinigen vermag, die in die Verbindung eingehende Gewichtsmenge ein durch einfache Zahlen ausdrückbares Vielfache der kleinsten zur Verbindung erforderlichen Gewichtsmenge ist. Dieses wichtige Gesetz (Dalton, 1803) wird das *Gesetz der vielfachen Verbindungsverhältnisse* oder der *Multipeln* genannt. Man kann sich das durch diese Gesetze ausgedrückte Verhalten am einfachsten durch die Annahme erklären, daſs jeder Grundstoff aus *unveränderlichen, unteilbaren* kleinsten Teilchen oder *Atomen* (v. griech. ἄτομος, „unteilbares Wesen“) bestehe, welche für die verschiedenen Grundstoffe derart verschieden sind, daſs ihre Massen sich verhalten wie die entsprechenden Verbindungsgewichte. Die Zahlen 100 für Quecksilber und 16 für Schwefel sagen demnach aus, daſs ein Atom Schwefel 16 Einheiten wiegt, wenn man das Gewicht eines Atoms Quecksilber gleich 100 Einheiten annimmt; man bezeichnet sie daher geradezu als *Atomgewichte.* Da die Atome selbstverständlich der unmittelbaren sinnlichen Wahrnehmung unzugänglich sind, so bleibt uns das wirkliche (absolute) Gewicht eines Atoms natürlich unbekannt; jene Zahlen drücken nur Gewichtsverhältnisse aus und könnten daher, je nach der Einheit, welche man dem Atomgewicht zu Grunde legen will, auch durch andere Zahlen, welche zu einander in demselben Verhältnis stehen, ersetzt werden. Nimmt man das Gewicht eines Atoms Wasserstoff = 1, so ist das Atomgewicht des Quecksilbers = 200, dasjenige des Schwefels = 32, des Sauerstoffs = 16, des Jods = 127 etc. Wenn wir ein Atom als „unteilbar“ bezeichnen, so kann damit selbstverständlich nicht gemeint sein, daſs es im mathematischen Sinn nicht weiter teilbar sei; in diesem Sinn kann die Teilung, wie bei jeder bestimmten Gröſse, natürlich bis ins

Unendliche fortgesetzt gedacht werden. Um den Begriff der „Unteilbarkeit“, welche wir dem Atom zuschreiben, zu erläutern, brauchen wir nur an das allgemein verständliche Wort „Individuum“ zu erinnern, welches sprachlich dieselbe Bedeutung hat wie das Wort „Atom“, indem es ebenfalls ein „unteilbares Wesen“ bezeichnet. Wie man bei Zergliederung einer Armee als letzte Bestandteile die „Individuen“, die einzelnen Soldaten, findet, so ergeben sich bei Zerlegung eines Körpers die Atome als letzte Bestandteile, deren weitere Teilung im Sinn der Naturlehre nicht mehr möglich ist. Ein kleinstes Teilchen Zinnober wird hienach gebildet, wenn ein Atom Quecksilber und ein Atom Schwefel zu innigem Verband zusammentreten, ein kleinstes Teilchen Mercurijodid entsteht, wenn sich ein Quecksilberatom mit zwei Jodatomen, und ein Teilchen Mercurojodid, wenn sich ein Quecksilberatom mit einem Jodatom vereinigt. Die kleinsten Teilchen der zusammengesetzten Körper sind demnach aus zwei oder mehreren Atomen zusammengesetzte Atomgruppen, welche man Moleküle nennt. Thatsachen, deren Darlegung hier zu weit führen würde, lehren, dafs auch in den Grundstoffen die Atome nicht vereinzelt vorkommen, sondern dafs auch hier gewöhnlich zwei Atome zu einem Molekül vereinigt sind. Demnach besteht jeder Körper zunächst aus Molekülen, deren jedes wieder aus gleichartigen oder verschiedenartigen Atomen gesetzmäfsig aufgebaut ist. Das Gewicht eines Moleküls (Molekulargewicht) ist gleich der Summe der Gewichte der in ihm vereinigten Atome; das Molekulargewicht des Zinnobers ist demnach $200+32=232$, dasjenige des Mercurijodids $200+127+127=454$, das des Mercurojodids $200+127=327$; ein Wasserstoffmolekül besteht aus zwei Wasserstoffatomen; sein Molekulargewicht ist also $=2$.

49. **Elemente.** Es gibt so viele verschiedene Arten von Atomen, als es Elemente (einfache oder Grundstoffe) gibt. Die Kenntnis der Atomgewichte dieser Elemente ergibt sich aus der Zusammensetzung der Verbindungen. Da nun die meisten Elemente mit dem Sauerstoff Verbindungen eingehen, so lassen sich diese Verhältniszahlen in Bezug auf den Sauerstoff mit besonderer Genauigkeit feststellen, während sich das Verhältnis zum Wasserstoff nicht mit der gleichen Sicherheit ermitteln läfst. Aus diesem Grunde ist es bei der neuesten Berechnung der Atomgewichte für zweckmäfsig erachtet und als Norm in die Wissenschaft eingeführt worden, nicht das Atomgewicht des Wasserstoffs $=1{,}000$ zu setzen, woraus für den Sauerstoff nach den genauesten Messungen 15,879 als Atomgewicht folgen würde, sondern für den Sauerstoff das Atomgewicht $=16{,}000$ zu setzen, wonach dann das des Wasserstoffs $=1{,}008$ zu setzen wäre. Die auf dieser Grundlage gewonnenen Werte für die Atomgewichte der Elemente sind nebst den chemischen Symbolen der Elemente in der folgenden Tabelle vereinigt, in der diejenigen Elemente, welche weit verbreitet sind und im Haushalt der Natur eine Rolle spielen, durch gesperrten Druck hervorgehoben sind.

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Aluminium | *Al* | 27,1 | Kalium | *K* | 39,15 | Sauerstoff | *O* | 16 |
| Antimon | *Sb* | 120 | Kobalt | *Co* | 59 | Scandium | *Sc* | 44,1 |
| Argon | *Ar* | 40 | Kohlenstoff | *C* | 12,00 | Schwefel | *S* | 32,06 |
| Arsen | *As* | 75 | Krypton | *Kr* | 81,6 | Selen | *Se* | 79,1 |
| Baryum | *Ba* | 137,4 | Kupfer | *Cu* | 63,6 | Silber | *Ag* | 107,93 |
| Beryllium | *Be* | 9,1 | Lanthan | *La* | 138 | Silicium | *Si* | 28,4 |
| Blei | *Pb* | 206,9 | Lithium | *Li* | 7,03 | Stickstoff | *N* | 14,04 |
| Bor | *B* | 11 | Magnesium | *Mg* | 24,36 | Strontium | *Sr* | 87,6 |
| Brom | *Br* | 79,96 | Mangan | *Mn* | 55,0 | Tantal | *Ta* | 183 |
| Cadmium | *Cd* | 112 | Molybdän | *Mo* | 96,0 | Tellur | *Te* | 127 |
| Calcium | *Ca* | 40 | Natrium | *Na* | 23,05 | Thallium | *Tl* | 204,1 |
| Cäsium | *Cs* | 133 | Neodym? | *Nd* | 144 | Thorium | *Th* | 232 |
| Cer | *Ce* | 140 | Neon | *Ne* | 20 | Titan | *Ti* | 48,1 |
| Chlor | *Cl* | 35,45 | Nickel | *Ni* | 58,7 | Uran | *U* | 239,5 |
| Chrom | *Cr* | 52,1 | Niobium | *Nb* | 94 | Vanadin | *V* | 51,2 |
| Eisen | *Fe* | 56,0 | Osmium | *Os* | 191 | Wasserstoff | *H* | 1,01 |
| Erbium? | *Er* | 166 | Palladium | *Pd* | 106 | Wismut | *Bi* | 208,5 |
| Fluor | *F* | 19 | Phosphor | *P* | 31,0 | Wolfram | *W* | 184 |
| Gallium | *Ga* | 70 | Platin | *Pt* | 194,8 | Xenon | *X* | 128 |
| Germanium | *Ge* | 72 | Praseodym? | *Pr* | 140 | Ytterbium | *Yb* | 173 |
| Gold | *Au* | 197,2 | Quecksilber | *Hg* | 200,3 | Yttrium | *Y* | 89 |
| Helium? | *He* | 4 | Rhodium | *Rh* | 103,0 | Zink | *Zn* | 65,4 |
| Indium | *In* | 114 | Rubidium | *Rb* | 85,4 | Zinn | *Sn* | 118,5 |
| Iridum | *Ir* | 193,0 | Ruthenium | *Ru* | 101,7 | Zirkonium | *Zr* | 90,6 |
| Jod | *J* | 126,85 | Samarium? | *Sa* | 150 | | | |

Will man ausdrücken, dafs mehrere Atome eines Elements in einer Verbindung enthalten sind, so fügt man dem Atomzeichen unten rechts die Atomzahl bei; die „chemische Formel“ $H_2O$ des Wassers z. B, sagt, dafs ein Wassermolekül aus 2 Atomen Wasserstoff und 1 Atom Sauerstoff besteht, und demnach auf 2 Gewichtsteile Wasserstoff 16 Gewichtsteile Sauerstoff enthält.

50. **Molekularkräfte.** Mit der Annahme unveränderlicher kleinster Teilchen ist notwendig die Vorstellung verknüpft, dafs diese Teilchen sich nicht unmittelbar berühren, sondern durch leere Zwischenräume (welche mit den sinnlich wahrnehmbaren Poren nicht zu verwechseln sind) voneinander getrennt sind. Denn nur so läfst sich die allgemeine Eigenschaft der Veränderlichkeit des Volumens verstehen; wenn der Rauminhalt eines Körpers durch Zug sich vergröfsert oder durch Druck sich vermindert, so werden nach dieser Anschauung die Moleküle einander genähert oder voneinander entfernt, und nicht die Teilchen selbst, sondern nur ihre Abstände erleiden eine Veränderung. Wenn aber die Teilchen eines Körpers nicht unmittelbar zusammenhängen, so müssen Kräfte zwischen ihnen thätig sein, welche ihren Zusammenhalt bewirken, ähnlich wie die Gravitation das Planetensystem zusammenhält. Man nennt diese Kräfte Molekularkräfte; ihre Stärke nimmt mit der Entfernung der Teilchen sehr rasch ab und wird schon in äufserst kleiner Entfernung (Radius der Wirkungssphäre) unmerklich. Denn hat man einen Körper zerbrochen, so gelingt es in der Regel nicht, die getrennten Stücke wieder zu vereinigen, weil man die Teilchen der Bruchflächen einander nicht mehr so nahe bringen kann, dafs die

molekulare Anziehung wieder hinreichende Stärke gewinnt. Sorgt man jedoch z. B. bei Metall- oder Glasplatten durch Abschleifen und Glätten für eine möglichst innige Berührung in zahlreichen Punkten, so haften sie mit großser Kraft aneinander (was durch den Luftdruck allein, der allerdings mitwirkt, nicht erklärt werden kann). Man nennt die molekulare Anziehungskraft, welche die Moleküle eines Körpers in ihrem Verbande zusammenhält, Kosäsion oder Zusammenhangkraft, und wenn sie das Aneinanderhaften der Teilchen verschiedener Körper bewirkt, Adhäsion oder Anhangkraft; letztere macht sich bei festen Körpern besonders dann mit grofser Stärke geltend, wenn der eine Körper anfangs flüssig war und dann durch Verdunsten oder Erstarren der Flüssigkeit erst fest geworden ist (Leimen, Kitten, Löten u. s. w.). Die Anziehungskraft zwischen den Atomen, welche die chemische Verbindung derselben zu gesetzmäfsig aufgebauten Atomgruppen oder Molekülen veranlafst, nennt man chemische Verwandtschaft oder Affinität. Die Physik beschäftigt sich nur mit Erscheinungen, bei welchen der innere Bau der Moleküle unberührt bleibt, die Chemie dagegen mit den Erscheinungen, welche in den Bau des Moleküls verändernd eingreifen.

51. **Kohäsion.** Festigkeit und Härte sind Äufserungen der Zusammenhangkraft oder Kohäsion, welche sich, wenn eine äufsere Kraft die Körperteilchen voneinander zu entfernen strebt, der Trennung derselben widersetzt. Festigkeit nennt man die Kraft, welche gerade hinreicht, eine Trennung der Teile zu bewirken. Je nach der Art des Angriffs der äufseren Kraft unterscheidet man verschiedene Arten der Festigkeit. Zugfestigkeit oder absolute Festigkeit heifst der Widerstand eines Körpers gegen das Zerreifsen. Sie ist proportional der Gröfse des Querschnitts, aber unabhängig von der Länge des Körpers; sie wird gemessen durch die Anzahl der Kilogramme, welche notwendig sind, um einen Stab oder Draht von 1 qmm Querschnitt zu zerreifsen. So hat z. B. Blei die Zugfestigkeit 2,2, Zinn 2,6, Gold 27, Silber 29, Platin 36, Kupfer 40, Messing 60, Eisen 63, Gufsstahl 83 kg. Durch Ausglühen oder Anlassen wird die Zugfestigkeit der meisten Metalle vermindert. Die relative oder Biegungsfestigkeit, d. h. der Widerstand gegen das Zerbrechen durch Biegung, ist bei Balken abhängig von der Länge derselben, von der Gröfse und Gestalt des Querschnitts, von der Art der Einwirkung auf den Balken und der Art seiner Unterstützung. Bei gleicher Masse besitzen hohle Balken und Röhren eine gröfsere Bruchfestigkeit. Rückwirkende Festigkeit nennt man den Widerstand gegen das Zerdrücken, Schub- oder Scherfestigkeit den Widerstand gegen die Trennung der Teilchen in seitlicher Richtung, Torsionsfestigkeit den Widerstand gegen das Zerdrehen oder Zerwinden.

Härte heifst der Widerstand, welchen ein Körper dem Ritzen seiner Oberfläche entgegensetzt. Um für die Bestimmung der Härte

Anhaltspunkte zu gewinnen, hat Mohs eine Reihe von Mineralien, welche sich in der Natur in unveränderlicher Beschaffenheit vorfinden, als Härteskala aufgestellt, nämlich 1) Talk, 2) Gips, 3) Kalkspat, 4) Flufsspat, 5) Apatit, 6) Feldspat, 7) Quarz, 8) Topas, 9) Korund, 10) Diamant. In dieser Reihe ritzt jedes Mineral das vorhergehende und wird von dem folgenden geritzt.

Je nach der Art, wie die Trennung der Teilchen erfolgt, wird das Verhalten der Körper hinsichtlich ihrer Kohäsion verschieden bezeichnet; wird der Zusammenhang nicht sogleich völlig gelöst, sondern geht dem Zerreifsen eine beträchtliche und bleibende Gestaltsänderung vorher, so heifst der Körper geschmeidig, dehnbar, biegsam; erfolgt dagegen die Trennung plötzlich und ohne vorangegangene merkliche Formänderung, so nennt man den Körper spröde. Harte Körper sind in der Regel spröde, weiche dagegen geschmeidig. Die Teile geschmeidiger Körper lassen sich durch blofses Zusammenpressen wieder zu einem Ganzen vereinigen: so werden z. B. Platingeräte durch Zusammenpressen des Platinschwammes hergestellt und zwei glühende Eisenstücke durch Zusammmenschweifsen miteinander zu einem Stück verbunden. Diese Eigenschaften sind weniger durch die stoffliche Beschaffenheit der Teilchen als vielmehr durch ihre gegenseitige Anordnung bedingt. Der Kohlenstoff z. B. ist als Diamant (regulär krystallisirt) der härteste aller Körper, als Graphit (hexagonal krystallisiert) dagegen sehr weich. Durch geringe Beimengungen anderer Stoffe, sowie durch Temperaturwechsel werden die Kohäsionsverhältnisse oft beträchtlich geändert. Am bekanntesten ist in dieser Beziehung das Eisen, welches durch eine geringe Vermehrung seines Kohlenstoffgehalts zu Stahl wird. Der erhitzte Stahl wird durch rasches Abkühlen gehärtet; beim Abkühlen wird nämlich zuerst die Oberfläche kalt und starr, während das Innere noch heifs und ausgedehnt bleibt; erkaltet nachher auch der Kern, so findet er in der wie ein Gewölbe widerstehenden Hülle ein Hindernis gegen die natürliche Zusammenziehung. So geraten die äufseren Teilchen in einen Zustand gewaltsamer Pressung, die inneren in einen Zustand gewaltsamer Spannung, der sich als Härte und Sprödigkeit offenbart. Durch Erwärmen („Anlassen“) wird dem gehärteten Stahl ein Teil seiner Sprödigkeit, aber freilich auch seiner Härte, wieder genommen. Auch das Glas wird durch rasches Abkühlen gehärtet (Hartglas). Die Glasthränen (batavische Tropfen) werden als sehr harte, in eine lange Spitze auslaufende Tropfen erhalten, wenn man geschmolzenes Glas in kaltes Wasser tropfen und dadurch plötzlich erstarren läfst; bricht man die Spitze ab, so zerspringen sie mit grofser Gewalt und zerfallen zu Staub, wie ein Gewölbe zusammenbricht, wenn man den Schlufsstein herausreifst. Die Bologneser Fläschchen, in der Luft rasch gekühlte Glasfläschchen mit sehr dickem Boden, zerspringen, wenn man einen Feuersteinsplitter hineinwirft, welcher die Oberfläche ritzt und dadurch den Widerstand aufhebt, welchen dieselbe

im unverletzten Zustande der inneren Spannung der Teilchen entgegensetzte.

52. **Elasticität.** Elastisch nennen wir einen Körper, welcher nach erlittener Formänderung in seine frühere Gestalt wieder zurückkehrt, sobald die formändernde Kraft aufgehört hat zu wirken. Alle festen Körper sind elastisch, vorausgesetzt, daſs die Formänderung eine gewisse Grenze, die Elasticitätsgrenze, nicht überschritten hatte. Wird diese Grenze überschritten, so tritt bei dehnbaren Körpern bleibende Gestaltsänderung und eine Schwächung des Zusammenhanges ein, welche bei wiederholten Angriffen endlich zum Zerreiſsen des Körpers führt; bei spröden Körpern dagegen erfolgt plötzlicher Bruch. Auch innerhalb der Elasticitätsgrenze kommen bei vielen Körpern, ja eigentlich bei allen, die Formänderungen nur allmählich zu stande, und werden nach Beseitigung der Kraft auch nur allmählich wieder rückgängig. Man nennt diese Erscheinung elastische Nachwirkung.

Wird ein Silberdraht von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt an einem Ende aufgehängt und am unteren Ende mit einem Gewichte von 1 kg beschwert, so verlängert er sich um 0,14 mm; das doppelte Gewicht bringt die doppelte, das dreifache Gewicht eine dreimal so groſse Verlängerung hervor etc.; wir finden also, daſs die Verlängerung in demselben Verhältnis wie die ziehende Kraft zunimmt (Hooke, 1675). Nehmen wir den Draht 2 m lang, so ergibt sich schon bei Belastung mit 1 kg eine Verlängerung von 0,28 mm; da nämlich jedes Meter sich um 0,14 mm ausdehnt, so muſs die gesamte Verlängerung jetzt doppelt so groſs ausfallen als vorhin, oder die Verlängerung ist der Länge des Drahtes proportional. Ein Silberdraht von 1 m Länge und 2 qmm Querschnitt wird durch 1 kg nur um 0,07 mm verlängert; der Draht von 2 qmm Querschnitt kann nämlich wie eine Vereinigung zweier Drähte von je 1 qmm Querschnitt angesehen werden, die ziehende Kraft verteilt sich alsdann zu gleichen Hälften gleichsam auf zwei Drähte, deren jeder nun bei 1 qmm Querschnitt nur von $^1/_2$ kg gezogen wird und sich daher nur um die Hälfte von 0,14 mm, d. h. um 0,07 mm, verlängert. Wir sehen also, daſs die durch die nämliche Kraft hervorgebrachte Verlängerung zum Querschnitt im umgekehrten Verhältnis steht. Diese Gesetze gelten übrigens nur innerhalb der Elasticitätsgrenze; für unseren Silberdraht (1 m, 1 qmm) z. B. wird diese Grenze erreicht bei einer Verlängerung von 1,4 mm, welche durch eine Belastung mit etwa 10 kg hervorgebracht wird; stärker darf der Draht nicht angestrengt werden, wenn keine merkliche Verlängerung zurückbleiben soll; diese Kraft kann als Maſs für die Elasticitätsgrenze der Substanz gelten. Vermöge der obigen Gesetze ist die Längenänderung eines Körpers durch eine Kraft vollständig bekannt, sobald man weiſs, um welchen Bruchteil seiner Länge ein Draht oder Stab von 1 qmm Querschnitt durch eine Zugkraft von 1 kg verlängert wird; man nennt diesen

Bruchteil Elasticitätskoëfficient (neuerdings wohl auch Modul der Verlängerung); der Elasticitätskoëfficient des Silbers ist demnach 0,00014 oder genauer $^1/_{7400}$, derjenige des Goldes $^1/_{8100}$, des Platins $^1/_{17000}$, des Kupfers $^1/_{12400}$, des Eisens $^1/_{21000}$, des Stahls $^1/_{19000}$, des Messings $^1/_{9000}$, des Neusilbers $^1/_{12000}$, des Bleies $^1/_{1800}$, des Glases $^1/_{6800}$.

Die Nenner dieser Brüche geben an, wieviel Kilogramm notwendig wären (für Stahl z. B. 19000 kg), um einen Draht des betreffenden Materials von 1 qmm Durchschnitt um seine eigene Länge auszudehnen, wenn man sich denkt, dafs die Elasticitätsgrenze so weit reiche. Man nennt diese Gröfse Elasticitätsmodul oder, in neuerer und besserer Bezeichnungsweise, elastischen Widerstand.

Bezeichnet man mit $L$ die Länge des Drahtes (in m), mit $q$ seinen Querschnitt (in qmm), mit $l$ (in m) die von der Belastung $P$ (in kg) hervorgebrachte Verlängerung, mit $\varepsilon$ den Elasticitätskoëfficienten und mit $E = 1/\varepsilon$ den Elasticitätsmodul, so lassen sich die obigen Gesetze zusammenfassen in der Gleichung:

$$l = \varepsilon \,.\, P \,.\, \frac{L}{q} \quad \text{oder} \quad P = E \,.\, \frac{l}{L} \,.\, q \,.$$

Läfst man auf einen Stab in der Richtung seiner Länge einen Druck wirken, so wird er um ebensoviel verkürzt, als er durch eine Zugkraft von derselben Gröfse verlängert wird. Die elastische Ausdehnung (Verkürzung) nach der Länge ist stets von einer Zusammenziehung (Anschwellung) nach der Quere begleitet. Das Verhältnis der Querkontraktion zur Längendilatation ist ebenso wie der Elasticitätsmodul eine dem Material eigentümliche Gröfse, deren Wert zwischen 0 und $^1/_2$ liegt und für die meisten Körper nahezu $^1/_4$ beträgt.

Besonders auffallend kann man die Thatsache, dafs die Formänderungen elastischer Körper im Verhältnis der einwirkenden Kräfte stehen, an schraubenförmig gewundenen Metalldrähten, sogenannten Schraubenfedern, wahrnehmen, da hier schon verhältnismäfsig kleine Kräfte durch Auseinanderziehen oder Zusammenschieben der Windungen bedeutende Längenveränderungen bewirken, ohne dafs die Elasticitätsgrenze erreicht wird. Man kann daher solche Schraubenfedern geradezu als Federwagen zu Gewichtsbestimmungen benutzen, sei es, dafs ein am oberen Ende befestigter, schraubenförmig gewundener dünner Draht durch seine an einer Millimeterskala abzulesende Verlängerung das Gewicht des Körpers angibt, welchen man in das unten angehängte Wagschälchen legt (Jollys Federwage), sei es, dafs eine unten aufgestützte und oben eine Schale tragende starke Schraubenfeder durch ihre Verkürzung unmittelbar an einer geradlinigen Skala oder durch Übertragung mittels eines Zeigers auf kreisförmigem Zifferblatt die Gewichte anzeigt, wie das bei manchen zu häuslichen Zwecken bestimmten

Federwagen der Fall ist. — Durch Hebelwagen vergleicht man Massen, durch Federwagen Kräfte. Eine Hebelwage liefert an allen Stellen der Erdoberfläche dieselben Angaben. Eine Federwage dagegen würde, wenn sie bei uns graduirt ist, am Äquator beim Anhängen eines Kilogrammgewichtsstückes weniger als ein Kilogramm zeigen. Federwagen, welche zur Messung gröfserer Kräfte bestimmt sind, nennt man Dynamometer oder Kraftmesser; dieselben bestehen gewöhnlich aus einem starken gebogenen Stahlstreifen (Feder), welcher durch seine Formänderung einen Zeiger in Bewegung setzt; schaltet man z. B. ein solches Dynamometer zwischen einem Pflug und dem vorgespannten Pferd ein, so kann man an der Skala in Kilogrammen die Kraft ablesen, welche das Pferd zum Fortziehen des Pfluges aufwenden mufs. Bei allen diesen Vorrichtungen besteht die Formänderung vorzugsweise in einer Biegung der angewendeten elastischen Metallstreifen oder Drähte.

Die Drehungs- oder Torsionselasticität wird in einem (cylindrischen) Stab oder gespannten Draht wachgerufen, wenn man denselben an seinem oberen Ende festklemmt und vermittelst eines am unteren Ende angebrachten wagerechten Hebelarms dreht oder drillt.

Das Drehungsmoment $D$, mit welchem er der Drillung widerstrebt, ist

$$D = \frac{(\pi r^2)^2}{l} T \nu,$$

wo $r$ den Radius, $l$ die Länge des Drahtes, $T$ seinen Torsionsmodul (oder Torsionswiderstand) und $\nu$ die Zahl der Umfänge bedeutet, um welche gedreht wurde. Der Torsionsmodul stellt somit das Moment vor, welches auf einen Draht von der Länge 1 (m) und dem Querschnitt 1 (qmm) wirkend denselben um 360° drillen würde. Zwischen Elasticitäts- und Torsionsmodul sowie dem Verhältnis der Querkontraktion zur Längendilatation besteht eine Beziehung, wonach für die meisten Materialien $T = 0{,}4\ E$ ist. Elasticitäts- und Torsionsmodul haben beide die Natur eines Druckes (Dimension $\mathrm{cm}^{-1}\ \mathrm{g}\ \mathrm{sec}^{-2}$).

Auf dem Gesetz, wonach das Drehungsbestreben dem Winkel, um welchen gedreht wurde, proportional ist, beruht die Drehwage (162), eine Vorrichtung, vermittelst welcher man kleine Kräfte dadurch mifst, dafs man ihnen durch die Drillung eines Drahts das Gleichgewicht hält.

Die Elasticität findet vielfache Anwendung im praktischen Leben. In den Taschen- und Stutzuhren dient sie als Triebkraft; ein im Federgehäuse befindlicher spiralförmiger Stahlreifen (Spiralfeder) wird nämlich beim Aufziehen zusammengewunden und dadurch gespannt (vgl. 19) und setzt, indem er sich vermöge seiner Elasticität allmählich wieder aufwindet, das Uhrwerk in Bewegung. Die gespannte Sehne des Bogens oder der Armbrust schleudert, plötzlich losgeschnellt, den Pfeil fort. Die Ballisten, die Belagerungsgeschütze der Alten, beruhten ebenfalls auf dieser Anwendung der Elasticität. Auch zur Entkräftung und Unschädlichmachung heftiger Stöfse ist die Elasticität von grofsem Nutzen; die Federn, welche die Wagenkasten tragen, ferner die starken Schraubenfedern, mit welchen die Puffer der Eisenbahnwagen ausgerüstet sind, dienen diesem Zweck.

53. **Elastische Schwingungen.** Hört die formändernde Kraft auf zu wirken, so wird jedes Teilchen der angegriffenen Körper durch die elastische Kraft, welche jener gleich und entgegengesetzt ist, in seine ursprüngliche Lage zurückgetrieben, kommt aber in dieser wegen seiner Trägheit nicht plötzlich zur Ruhe, sondern geht jenseits darüber hinaus, wodurch eine entgegengesetzte Formänderung (z. B. Verkürzung statt Verlängerung) entsteht, kehrt dann unter dem Einfluſs der wachgerufenen entgegengesetzten elastischen Kraft wieder zurück u. s. f., und kommt erst nach einer Reihe solcher Schwingungen (Oscillationen, Vibrationen) endlich in der ursprünglichen (Gleichgewichts-) Lage zur Ruhe. Da hierbei die treibende Kraft stets der Entfernung von der Gleichgewichtslage oder dem bis dahin noch zu durchlaufenden Weg proportional ist, so sind diese elastischen Schwingungen alle von gleicher Dauer oder isochron, wie diejenigen eines Pendels von kleiner Schwingungsweite. Man pflegt jedoch bei diesen Schwingungen die für einen Hin- und Hergang erforderliche Zeit als Schwingungsdauer zu rechnen, und nicht, wie beim Pendel, die Dauer eines Hin- oder Hergangs. An einem lotrecht herabhängenden schraubenförmig gewundenen Metalldraht, an welchen unten ein Gewichtstück gehängt ist, kann man die elastischen Schwingungen leicht mit dem Auge verfolgen. Zieht man das Gewicht mit den Fingern herab und läſst es dann los, so schwingt es vertikal auf und ab, indem der Draht sich abwechselnd verkürzt und verlängert, und man zählt in gleicher Zeit immer gleich viele Schwingungen, ob man nun das Gewicht tiefer oder weniger tief herabgezogen haben mag.

Indem man das Gewichtstück z. B. um 2 cm herabführt, hat man mit der Hand gegen das gleichmäſsig wachsende elastische Widerstreben des Drahtes (im Mittel) nicht nur einen zweimal so groſsen Zug auszuüben, sondern dabei auch einen zweimal so groſsen Weg zurückzulegen, als wenn man es nur um 1 cm herabführt. Die Arbeit, welche man in jenem Fall zur Überwindung der elastischen Kraft des Drahtes leisten muſs, ist daher viermal so groſs als in diesem Fall, und wenn man mit dreifacher Kraft das Gewicht in die dreifache Entfernung bringt, so hat man die neunfache Arbeit aufzuwenden von derjenigen im ersten Fall. Indem man die Hand entfernt, geht die von ihr geleistete Arbeit auf das Gewicht über und offenbart sich in der Wucht oder Energie seiner schwingenden Bewegung. Bei doppelter Schwingungsweite erfolgt also die Schwingung mit vierfacher, bei dreimal so groſser Schwingungsweite mit neunfacher Wucht etc., oder allgemein ausgedrückt: die Wucht der schwingenden Bewegung ist proportional dem Quadrate der Schwingungsweite.

Die Schwingungsdauer eines unter dem Einfluſs der Elasticität schwingenden Körperteilchens kann in ähnlicher Weise berechnet werden wie die eines Pendels. Ein solches Teilchen könnte ebenso wie der Pendelkörper einer kreisförmigen Bewegung fähig sein, die in zwei zu einander senkrechte Schwingungen von gleicher Dauer zerlegt gedacht

werden kann. Bezeichnet man mit $p$ die Kraft in der Entfernung 1 von der Gleichgewichtslage, so ist in einem Kreise vom Radius $r$ die nach dem Mittelpunkt wirkende Centripetalkraft $pr$; andrerseits ist dieselbe, wenn $T$ die Umlaufszeit und $m$ die Masse des Körperteilchens bezeichnet, $4\pi^2 mr / T^2$. Es mufs also

$$pr = \frac{4\pi^2 mr}{T^2}$$

sein, woraus sich die Schwingungsdauer

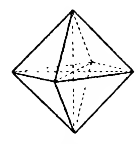
$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{p}}$$

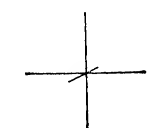
ergibt.

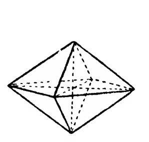
Von der unverändert gleichen Dauer der elastischen Schwingungen macht man eine wichtige Anwendung zur Regulirung der Taschenuhren (Hooke, 1658); indem sich nämlich die an der Unruhe befestigte zarte Spiralfeder in gleichdauernden Schwingungen abwechselnd auseinander und wieder zusammenwindet, bewirkt sie, dafs die Hemmung des Steigrads durch die Unruhe in genau gleichen Zeitabschnitten erfolgt und der Sekundenzeiger demnach beim Fortrücken zu jedem seiner Sprünge genau die gleiche Zeit braucht.

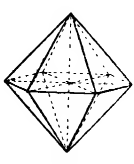
54. **Krystallisation.** Krystall nennt man jeden festen Körper mit regelmäfsigem inneren Gefüge, welches sich bei ungestörter Entwickelung auch äufserlich durch eine regelmäfsige, von ebenen Flächen begrenzte Gestalt kund gibt. Schlägt man mit dem Hammer auf ein Stück Kalkspat, so zerfällt dasselbe in eckige Stückchen, deren jedes von sechs Flächen begrenzt ist, von denen je zwei und zwei gegenüberliegende zu einander parallel sind. Jedes dieser Stückchen kann parallel seinen Begrenzungsflächen leicht in immer kleinere Teilchen von derselben Form gespalten werden. Durch diese Spaltbarkeit nach drei bestimmten Richtungen verrät sich die Regelmäfsigkeit des inneren Gefüges des Kalkspats; damit im Einklang ist die äufsere Gestalt der in der Natur sich findenden Kalkspatkrystalle (Fig. 53), welche (in ihrer einfachsten Form) von sechs Flächen begrenzt sind, die paarweise mit jenen drei inneren Spaltungsrichtungen parallel laufen. Die Begrenzungsflächen eines Krystalls sind nicht immer, wie in dem angeführten Beispiel, zu den Spaltungsrichtungen parallel; sie stehen aber zu ihnen stets in der innigsten gesetzmäfsigen Beziehung. Die Krystallbildung (Krystallisation) erfolgt, wenn die Abscheidung eines festen Körpers aus seiner Lösung oder das Erstarren eines geschmolzenen Körpers langsam und ruhig vor sich geht, indem alsdann die kleinsten Teile (Moleküle) des Körpers sich unter der Wirkung molekularer Anziehungskräfte in regelmäfsiger Weise aneinander fügen. Alle Krystallgestalten lassen sich auf sechs Grundformen zurückführen; jede Grundform mit den aus ihr abgeleiteten Formen bildet ein Krystallsystem. Als Grundform des regelmäfsigen, regulären oder tesseralen Systems

kann man den regelmäfsigen Achtflächner (das reguläre Oktaëder, Fig. 49) ansehen, eine von acht gleichen gleichseitigen Dreiecken begrenzte Doppelpyramide; die drei geraden Linien, welche je zwei gegenüberliegende Ecken des Oktaëders verbinden und sich in seinem Mittelpunkt rechtwinklig schneiden, nennt man die Achsen des Krystalls. Dieses aus drei gleichen zu einander senkrechten Achsen bestehende Achsenkreuz (Fig. 50) ist für die Gestaltungsverhältnisse aller zum regulären System gehörigen Krystallformen mafsgebend. Ebenso werden auch die übrigen Krystallsysteme am einfachsten durch die Achsenkreuze gekennzeichnet, auf welche ihre Formen bezogen werden können. Das quadratische oder tetragonale

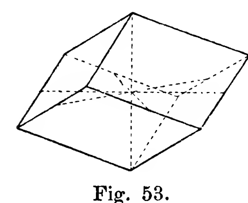

Fig. 49. Oktaëder.


Fig. 50. Reguläres Achsenkreuz.


Fig. 51. Quadratische Doppelpyramide.


Fig. 52. Sechsseitige Doppelpyramide.

System zeichnet sich aus durch drei ebenfalls zu einander senkrechte Achsen, von welchen zwei einander gleich, die dritte oder Hauptachse dagegen kürzer oder länger ist. Als Grundform desselben kann die von acht gleichen gleichschenkligen Dreiecken eingeschlossene quadratische Doppelpyramide (Fig. 51) gelten. Die Krystalle des hexagonalen Systems werden auf vier Achsen bezogen, von denen drei einander gleiche in einer Ebene liegen und sich unter Winkeln von 60° durchschneiden, während die vierte oder Hauptachse auf dieser Ebene senkrecht steht und von jenen drei „Nebenachsen“ verschieden ist. Grundform ist die von zwölf gleichschenkligen Dreiecken begrenzte sechsseitige Doppelpyramide (Fig. 52). Denkt man sich an diesem Krystall die erste, dritte, fünfte Fläche der oberen und die zweite, vierte, sechste der unteren Pyramide bis zum Verschwinden der übrigen Flächen ausgedehnt, so erhält man das von sechs rautenförmigen Flächen begrenzte Rhomboëder (Rautenflächner, Fig. 53). Krystallformen, welche auf diese Weise, nämlich durch Ausdehnung der abwechselnden Flächen bis zum Verschwinden der anderen Flächen, entstanden sind, nennt man Halbflächner oder Hemiëder. Das rhombische System ist durch drei zu einander rechtwinklige ungleiche Achsen gekennzeichnet. Das klinorhombische, monokline oder monosymmetrische System hat ebenfalls drei ungleiche Achsen, von denen zwei einander unten schiefen Winkeln schneiden, während die dritte auf der durch


Fig. 53. Rhomboëder.

diese beiden gelegten Ebene senkrecht steht. Im klinorhomboidischen, triklinen oder asymmetrischen Krystallsystem endlich schneiden sich alle drei ungleichen Achsen schiefwinklig. — In der Regel ist jedem (einfachen oder zusammengesetzten) Stoff eine bestimmte Krystallform eigen, oder die verschiedenen Krystallformen, deren er fähig ist, lassen sich doch auf eine einzige Grundform zurückführen, oder was dasselbe ist, sie gehören ein und demselben Krystallsystem an. Manche Stoffe jedoch vermögen in zwei verschiedenen Systemen zu krystallisieren; man nennt sie deswegen dimorph (zweigestaltig). Der kohlensaure Kalk z. B. krystallisirt als Kalkspat im hexagonalen System (als Rhomboëder) und als Aragonit in verschiedenen Formen des rhombischen Systems. Körper, welche aus einem Haufwerk unvollkommen ausgebildeter Krystalle bestehen (z. B. Marmor, weifser Zucker), nennt man krystallinisch. Körper dagegen, welchen jedes krystallinische Gefüge abgeht, heifsen amorph (gestaltlos).

Die amorphen Körper, deren inneres Gefüge nach allen Seiten hin die gleiche Beschaffenheit zeigt, besitzen auch nach allen Richtungen die gleichen physikalischen Eigenschaften (z. B. Glas, alle Flüssigkeiten). Dasselbe findet auch statt bei den Krystallen des regulären Systems, deren innerer Bau durch drei unter sich gleichwertige zu einander senkrechte Achsen gekennzeichnet ist. Man nennt solche Körper isotrop. Die Krystalle der fünf übrigen Systeme dagegen zeigen nach verschiedenen Richtungen verschiedenes Verhalten hinsichtlich ihrer Festigkeit, Härte, Elasticität, Wärmeleitungsvermögen, Lichtfortpflanzung u. s. w. Solche Körper heifsen anisotrop oder heterotrop.

55. **Stofs.** Ein Stofs findet statt beim Zusammentreffen eines bewegten Körpers mit einem anderen in Ruhe oder ebenfalls in Bewegung befindlichen Körper. Es stofse z. B. ein in Bewegung befindlicher Eisenbahnwagen auf einen anderen, welcher ruhig auf den Schienen steht. Sobald die Puffer miteinander in Berührung kommen, übt jener Wagen auf diesen einen Druck aus und erleidet von ihm einen gleich grofsen Gegendruck; dadurch wird der gestofsene Wagen in Bewegung gesetzt und beschleunigt, die Bewegung des stofsenden dagegen verzögert. Dieser Druck kann jedoch nur so lange dauern, bis beide Wagen die gleiche Geschwindigkeit besitzen; in dem Augenblick, in welchem dies erreicht wird, ist der erste Teil der Stofswirkung vollendet. Nun sind aber die Puffer der Eisenbahnwagen bekanntlich mit schraubenförmig gewundenen stählernen Federn versehen; diese werden, während die Wagen aufeinander wirken, mit einer dem gegenseitigen Druck gleichen Kraft zusammengedrückt, springen aber, sobald der Druck aufhört, vermöge ihrer Elasticität mit derselben Kraft wieder heraus, so dafs in diesem zweiten Teil der Stofswirkung der stofsende Wagen nochmals den gleichen Druck nach rückwärts, der gestofsene nach vorwärts empfängt wie im ersten Teile. Sind z. B. die beiden Wagen von gleicher Masse, d. h.

gleichschwer, so hat am Ende des ersten Teiles der Stoſswirkung der nachfolgende Wagen die Hälfte seiner Geschwindigkeit verloren, da er sie an den vorausgehenden abtreten muſste; im zweiten Teile erleidet er den gleichen Verlust nochmals und kommt demnach zur Ruhe, während der gestoſsene, anfangs in Ruhe befindliche Wagen, indem er im zweiten Teile dieselbe Beschleunigung erfährt wie im ersten, mit der ganzen ursprünglich dem stoſsenden Wagen eigenen Geschwindigkeit vorwärts geht. Ganz das nämliche ereignet sich, wenn zwei elastische Körper, z. B. zwei elfenbeinerne Billardkugeln, zusammenstoſsen; im ersten Teile des Stoſses platten sie sich an der Berührungsstelle gegenseitig ab, im zweiten Teile nehmen sie ihre ursprüngliche Gestalt wieder an, indem die Abplattungen federnd herausspringen, und sie gehen mit vertauschten Geschwindigkeiten weiter. Daſs eine Abplattung beim Zusammenstoſs stattfindet, kann man nachweisen, indem man eine Elfenbeinkugel auf eine mit Ruſs geschwärzte Marmorplatte herabfallen läſst; dieselbe springt bis fast zur ursprünglichen Höhe wieder zurück, und zeigt, obgleich wieder vollkommen rund geworden, einen kreisförmigen schwarzen Fleck von beträchtlich gröſserem Durchmesser, als wenn man sie nur einfach auf die ruſsige Fläche gelegt hätte, zum Beweis, daſs sie im Augenblick des Stoſses in der ganzen Ausdehnung jenes Fleckes mit der ebenen Platte in Berührung war. Beim elastischen Stoſs geht von der gesamten Wucht der aufeinander treffenden Körper nichts verloren, denn derjenige Teil der Wucht, welcher im ersten Abschnitt des Stoſses zur Abplattung oder zum Zusammendrücken der Feder verbraucht (als Bewegungsenergie verschwunden und in ruhende Energie der gespannten Feder verwandelt) war, wird im zweiten Abschnitt, indem die Abplattung sich ausgleicht oder die Feder sich entspannt, wieder vollkommen in Bewegungsenergie (Wucht) zurückverwandelt. Anders verhält es sich beim Stoſs unelastischer Körper; wären z. B. die Federn der Puffer aus Blei statt aus Stahl gemacht, so würden dieselben beim Zusammentreffen der beiden Eisenbahnwagen ebenfalls zusammengedrückt werden, dann aber nicht wieder herausspringen; der zweite Akt des Stoſses fällt also ganz weg, die Wagen gehen jetzt mit der halben Geschwindigkeit des stoſsenden vereint weiter und haben nun denjenigen Teil der ursprünglich vorhandenen Wucht, welcher auf die Zusammendrückung und Erwärmung des Bleies verwendet wurde, eingebüſst.

Bewegen sich zwei Massen $m$ und $m'$ (Fig. 54) in derselben Geraden mit den Geschwindigkeiten $c$ und $c'$ ($c' > c$) in gleicher Richtung ($\longrightarrow$), und haben dieselben nach Beendigung des ersten Teils des Stoſses die gemeinsame Geschwindigkeit $u$ erlangt, so hat die erstere den Betrag $u - c$ an Geschwindigkeit gewonnen, die letztere $c' - u$ verloren. Die Stoſskräfte, welche die beiden Körper dabei aufeinander ausübten, werden durch die Produkte der Massen mit den entsprechenden Geschwindigkeitsänderungen ausgedrückt: sie sind als Druck und Gegendruck einander gleich. Man hat daher

$$m(u - c) = m'(c' - u)$$

oder

$$(m + m')u = mc + m'c',$$

d. h. die Summe der Bewegungsgröfsen vor und nach dem Stofs ist die nämliche. Dies gilt sowohl für elastische als für unelastische Körper.

Da bei unelastischen Körpern der zweite Akt des Stofses wegfällt, so gehen sie vereint mit der gemeinsamen Geschwindigkeit

$$u = \frac{mc + m'c'}{m + m'}$$

weiter; die Geschwindigkeit nach dem Stofs ist also das nach der Mischungsregel berechnete Mittel aus den Geschwindigkeiten vor dem Stofs.

Sind dagegen die aufeinander stofsenden Körper vollkommen elastisch, so gewinnt die Masse $m$ im zweiten Akte des Stofses zu der Geschwindigkeit $u$ noch den Zuwachs $u - c$, die Masse $m'$ verliert nochmals $c' - u$, und ihre Geschwindigkeiten $v$ und $v'$ nach dem Stofs sind $v = u + (u - c)$ und $v' = u - (c' - u)$, oder

$$v = 2u - c, \quad v' = 2u - c',$$

wo man nur den obigen Wert von $u$ einzusetzen hat, um $v$ und $v'$ durch $m$, $m'$, $c$, $c'$ ausgedrückt zu erhalten.

Fig. 54.
Stofs.

Sind die Massen gleich ($m' = m$), so ist $2u = c + c'$ und daher

$$v = c' \text{ und } v' = c,$$

d. h. gleiche elastische Massen gehen nach dem Stofs mit vertauschten Geschwindigkeiten weiter. Alle diese Gleichungen gelten nicht nur, wenn sich, wie angenommen wurde, die Körper in gleicher Richtung bewegen, sondern auch, wenn sie sich entgegen gehen; man hat nur die entgegengesetzte Geschwindigkeit negativ zu nehmen.

Man kann sich leicht überzeugen, dafs $mv^2 + m'v'^2 = mc^2 + m'c'^2$ ist, dagegen $mu^2 + m'u'^2 < mc^2 + m'c'^2$, d. h. beim Stofs elastischer Massen ist die gesamte Bewegungsenergie vor und nach dem Stofs die nämliche, beim Stofs unelastischer Massen dagegen geht Bewegungsenergie verloren.

Zum Nachweis der Gesetze des Stofses bedient man sich der Stofs- oder Perkussionsmaschine; zwei oder mehrere Kugeln sind, sich gegenseitig berührend, an einem Gestell aufgehängt. Hebt man die eine bis zu einer gewissen Höhe und läfst sie los, so stöfst sie, längs eines Kreisbogens herabfallend, in wagrechter Richtung auf die andere. Sind die Kugeln elastisch (z. B. aus Elfenbein) und von gleicher Masse, so kommt die stofsende zur Ruhe, während die gestofsene sich bis zu derselben Höhe erhebt, von welcher jene herabkam. Hat man mehrere (z. B. sieben) gleiche Kugeln in einer Reihe aufgehängt, und läfst die erste stofsen, so fliegt nur die siebente weg, die dazwischen liegenden bleiben in Ruhe, indem jede von der vorhergehenden deren ganze Geschwindigkeit übernimmt und auf die folgende überträgt. Läfst man die zwei ersten Kugeln vereint stofsen, so gehen am andern Ende der Reihe die zwei letzten weg; und stofsen die drei ersten Kugeln, so fliegen die drei letzten Kugeln zusammen fort, und nur die mittlere bleibt in Ruhe.

Zwei unelastische gleiche Kugeln aus feuchtem Thon gehen nach dem Stofs mit dauernder Abplattung und mit der halben Geschwindigkeit vereint weiter.

Trifft ein elastischer Körper senkrecht gegen eine unbewegliche elastische Wand, so prallt er mit unveränderter Geschwindigkeit

in derselben Richtung zurück. Trifft er die Wand in schiefer Richtung, so wird er unter gleichem Winkel und mit derselben Geschwindigkeit zurückgeworfen, wie man beim Billardspiel leicht beobachten kann.

Ist die Lage der beiden Massen $m$ und $m'$ auf der ihre Schwerpunkte verbindenden Geraden in irgend einem Augenblick vor dem Stofs durch ihre Abstände $r$ und $r'$ von einem beliebigen Punkte $A$ (Fig. 55) dieser Geraden gegeben, so wird der Abstand $s$ ihres gemeinsamen Schwerpunktes von $A$ bekanntlich (28) durch die Gleichung

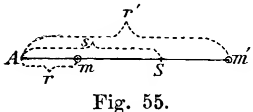


Fig. 55.
Erhaltung des Schwerpunktes.

$$(m + m')s = mr + m'r'$$

bestimmt. Bewegen sich die Massen im nächsten kleinen Zeitteilchen $\tau$ um die kleinen Strecken $\varrho$ und $\varrho'$ weiter, so wird sich auch ihr Schwerpunkt gleichzeitig um die Strecke $\sigma$ derart verschieben, dafs noch immer die Gleichung

$$(m + m')(s + \sigma) = m(r + \varrho) + m'(r' + \varrho')$$

gilt, aus welcher, da die vorige ihre Geltung behält, hervorgeht, dafs auch

$$(m + m')\,\sigma = m\varrho + m'\varrho'$$

ist. Dividirt man hier beiderseits mit $\tau$, so sind $\varrho/\tau = c$ und $\varrho'/\tau = c'$ die Geschwindigkeit der Massen $m$ und $m'$ für sich, und $\sigma/\tau = u$ die Geschwindigkeit ihres gemeinsamen Schwerpunktes, und letztere wird bestimmt durch dieselbe Gleichung

$$(m + m')u = mc + m'c',$$

aus welcher sich vorhin die Geschwindigkeit nach dem Stofs ergab. Die Geschwindigkeit des gemeinschaftlichen Schwerpunktes vor dem Stofs ist also die nämliche, wie dessen Geschwindigkeit nach dem Stofs, oder die Bewegung des gemeinsamen Schwerpunktes wird durch den Stofs nicht geändert. Dieses Prinzip der Erhaltung des Schwerpunktes gilt nicht nur für zwei, sondern für beliebig viele Massen, die bei ihren Bewegungen beliebig oft zusammenstofsen, weil bei jedem Stofs die ausgeübten Druckkräfte gleich und entgegengesetzt sind, und daher auf die Bewegung des Schwerpunktes der Gesamtheit keinen Einflufs üben können. Beim Platzen einer Granate z. B. bewegt sich der gemeinsame Schwerpunkt aller Sprengstücke in der ursprünglichen parabolischen Bahn unbeirrt weiter.

56. **Reibung** (Friktion). Wenn zwei unter gegenseitigem Druck in Berührung befindliche Körper sich aneinander hinbewegen, so wirkt infolge der mangelhaften Glätte ihrer Oberflächen ihrer Bewegung eine Kraft entgegen, welche man als Reibung bezeichnet. Die Gröfse des Reibungswiderstandes kann durch folgende einfache Vorrichtung (Coulombs Tribometer, 1781) ermittelt werden. Ein zur Aufnahme von Belastungsgewichten bestimmtes Kästchen mit flachem Boden kann auf einer wagrechten Fläche oder auf zwei Schienen gleiten; eine an demselben befestigte Schnur geht über eine Rolle und trägt an ihrem Ende eine Wagschale. Auf diese werden so lange Gewichte aufgelegt, bis sich das Kästchen in Bewegung setzt; das hierzu erforderliche Gewicht (mit Einrechnung des Gewichtes der Wagschale) gibt den Reibungswiderstand an, welcher zu überwinden war. Es ergibt sich zunächst, dafs der Reibungswiderstand der Belastung mit Einrechnung des Gewichtes des Kästchens, also dem senkrecht gegen die Berührungsfläche ausgeübten Druck, pro-

portional ist. Er ist ferner bei gleichem Druck auf die Flächeneinheit um so gröſser, je gröſser die Fläche ist. Bei gleichem Gesamtgewicht ist er daher unabhängig von der Gröſse der Berührungsfläche, weil in diesem Falle der Druck auf die Flächeneinheit um so gröſser wird, je kleiner die Unterstützungsfläche der Last wird.

Den für die nämlichen Materialien unveränderlichen Bruchteil, welcher angibt, der wievielte Teil jenes Druckes zur Überwindung des Reibungswiderstandes erforderlich ist, nennt man den Reibungskoëfficienten. Der Reibungskoëfficient beträgt z. B. für Guſseisen auf Guſseisen 0,16 oder 16 Proz., für Guſseisen auf Bronze 0,15, für Bronze auf Bronze 0,20. Hieraus ist zu ersehen, daſs die Reibung zwischen gleichartigen Körpern gröſser ist als zwischen ungleichartigen.

Wie der Reibungswiderstand bei Maschinen in Rechnung gezogen werden kann, lehrt das folgende Beispiel. Liegt ein schwerer Körper auf einer (verstellbaren) schiefen Ebene, so zerlegt sich sein vertikal abwärts wirkendes Gewicht $Q$ in zwei Komponenten (21), von denen die eine $Q \cos \alpha$, auf der schiefen Ebene, deren Neigungswinkel $\alpha$ sei, senkrecht steht, die andere $Q \sin \alpha$, mit der schiefen Ebene parallel ist. Die erstere stellt den Druck dar, mit welchem der Körper gegen die schiefe Ebene gepresst wird, und gibt zu einem Reibungswiderstande Anlaſs, welcher, wenn der Reibungskoëfficient mit $f$ bezeichnet wird, $f Q \cos \alpha$ beträgt; die letztere dagegen sucht den Körper längs der schiefen Ebene herabzutreiben. Läſst man die Neigung der schiefen Ebene von Null an zunehmen, so bleibt der Körper in Ruhe, solange der Reibungswiderstand gröſser ist als die Gleitkraft. Erst bei einem gewissen Winkel, dem Reibungswinkel (Ruhewinkel), bei welchem die Reibung der Gleitkraft gleich oder $f Q \cos \alpha = Q \sin \alpha$ wird, beginnt der Körper herabzugleiten. Aus dieser Gleichung aber ergibt sich

$$f = \operatorname{tg} \alpha.$$

Man kann also den Reibungskoëfficienten durch Messung des Reibungswinkels bestimmen. — Der Böschungswinkel, welchen lockere Massen, z. B. Sand, beim Aufschütten bilden, ist ihrem Reibungswinkel gleich.

Die Reibung heiſst gleitend, wenn, wie in den bisher betrachteten Fällen, der eine Körper auf dem andern fortgeschoben wird, wobei seine Unebenheiten entweder abgerissen oder über diejenigen der Unterlage weggehoben werden müssen; man nennt dagegen die Reibung wälzend oder rollend, wenn ein runder Körper, z. B. eine Walze, ein Rad, über die Unterlage hinrollt; da in diesem Falle die Hervorragungen des einen Körpers in die Vertiefungen des anderen eingreifen und sich wieder losmachen wie die Zähne eines Zahnrades, so ist die wälzende Reibung viel geringer als die gleitende; sie ist dem Drucke direkt, dem Halbmesser der Walze oder des Rades umgekehrt proportional. Es gewährt daher beim Fort-

schaffen von Lasten einen grofsen Vorteil, die gleitende Reibung in wälzende umzuwandeln, indem man Walzen unterlegt oder ein mit Rädern versehenes Fuhrwerk benutzt.

Bei jeder Maschine wird ein Teil ihrer Arbeit unter Umwandlung in Wärme zur Überwindung der unvermeidlichen Reibungswiderstände verbraucht, und geht daher für die Nutzung verloren; man wendet, um die Reibung möglichst zu vermindern, Schmiermittel an, die sich als ganz dünne Flüssigkeitsschicht zwischen die gleitenden Flächen lagern und deren unmittelbare Berührung verhindern. Die übrig bleibende Reibung ist dann wesentlich durch den Widerstand bestimmt, den die Flüssigkeitsteilchen bei ihrer Verschiebung innerhalb dieser dünnen Flüssigkeitsschicht erfahren (Petroff, 1887). Die Reibung ist übrigens in vielen Fällen auch nützlich; alles Befestigen und Verbinden der Körper durch Nägel, Schrauben, Schnüre etc. ist nur vermöge der Reibung möglich; die Fortleitung der Bewegung durch Treibriemen, die Verzögerung der Bewegung durch Bremsen beruhen auf Reibung. Ohne Reibung würde unser Fufs nicht am Boden haften, und die Lokomotive würde auf vollkommen glatten Schienen mit umlaufenden Rädern stehen bleiben, wie es bei Glatteis manchmal geschieht.

Bei Pronys Zaum oder Bremsdynamometer (1822) wird die Reibung zur Messung der Arbeitsleistung von Maschinen benutzt. Zwei ausgehöhlte Holzbacken, von welchen der untere einen Hebel mit Wagschale trägt, werden mittels Schraubenmuttern an die Welle der Maschine angeprefst. Man bestimmt das Gewicht $P$, welches bei normaler Tourenzahl am Ende des Hebelarmes $l$ angebracht werden mufs, damit der Hebel von der sich drehenden Welle vermöge ihrer Reibung an den Holzbacken (dem Zaume) nicht mitgenommen werde, sondern horizontal schwebe. Dann ist $Pl$ das Drehungsmoment, welches demjenigen der Reibung das Gleichgewicht hält, und $\omega Pl$ die per Sek. geleistete Arbeit, wenn $\omega$ die Winkelgeschwindigkeit der Welle bezeichnet. Für $n$ Umdrehungen in der Minute hat man $\omega = 2\pi n/60$; ist $P$ in kg, $l$ in m ausgedrückt, so ergibt sich die Leistung in Meterkilogrammen $= 2\pi n Pl : 60$, und in Pferdekräften, wenn man noch durch 75 dividirt (17).

---

# III. Flüssigkeiten.

## (Hydrostatik.)

57. **Flüssige Körper.** Während die Teilchen der festen Körper sich gegenseitig in bestimmten festen Lagen erhalten, zeichnen sich die Flüssigkeiten durch die freie Verschiebbarkeit ihrer Teilchen aus. Sie haben infolgedessen keine selbständige Form, wie die festen Körper, sondern schmiegen sich der Gestalt des Gefäfses an. Während sie aber einer Änderung ihrer Form keinen merklichen Widerstand entgegensetzen, widerstreben sie einer Verkleinerung ihres Rauminhaltes mit aufserordentlich grofser Kraft. Sie haben eine so geringe Zusammendrückbarkeit, dafs man sie lange für unzusammendrückbar gehalten hat und sie unter gewöhnlichen Umständen auch ohne erheblichen Fehler als unzusammendrückbar ansehen kann. Wasser z. B. wird durch einen Druck von 1 kg pro qcm nur um 50 Millionteile seines Volumens zusammengeprefst (71), und nimmt nach Aufhören des Druckes sein ursprüngliches Volumen sofort wieder an. Dabei hält die Kraft, mit der die geprefste Flüssigkeit sich auszudehnen strebt, dem auf sie ausgeübten Druck das Gleichgewicht. Die Flüssigkeiten sind also vollkommen elastisch hinsichtlich ihres Rauminhaltes (Volum-Elasticität), dagegen gar nicht elastisch hinsichtlich ihrer Form.

Auch die festen Körper besitzen Volum-Elasticität, aber sie sind noch weniger zusammendrückbar als die Flüssigkeiten. Bei Stahl z. B. ist die Volumverminderung, die durch einen von allen Seiten ausgeübten gleichen Druck hervorgerufen werden würde, 100 mal kleiner als für Wasser unter den gleichen Druckverhältnissen.

58. **Fortpflanzung des Druckes.** Vermöge der leichten Verschiebbarkeit ihrer Teilchen verhalten sich die Flüssigkeiten einem auf sie ausgeübten Druck gegenüber ganz anders als die festen Körper. Wird auf einen festen Körper, der auf einer Unterlage steht, von oben nach unten ein Druck ausgeübt, so überträgt sich derselbe in dieser Richtung auf die Unterlage. Widersteht die Unterlage, so wird der Körper in senkrechter Richtung etwas zusammengeprefst und wird sich zugleich seitlich etwas ausbauchen. Grenzt er auch hier an einen anderen, ihm widerstehenden Körper, so wird er auch auf diesen, also in seitlicher Richtung einen Druck ausüben. Aber dieser Druck würde im allgemeinen nicht die gleiche Gröfse wie der Druck auf die Unterlage haben.

Denken wir uns dagegen ein cylindrisches Gefäſs mit einer aus losen, beweglichen Teilchen bestehenden Substanz, z. B. mit feinen Schrotkörnern oder mit Sand, angefüllt und mittels eines an die Gefäſswand anschlieſsenden Kolbens einen Druck auf die Oberfläche der Schrot- oder Sandmasse ausgeübt, so werden die zunächst gedrückten Körnchen sich zwischen die benachbarten einzukeilen und diese, weil ihnen nach allen Richtungen die gleiche Möglichkeit des Ausweichens gegeben ist, nicht nur nach vorwärts, sondern auch nach seitwärts und sogar nach rückwärts zu drängen bestrebt sein. Der ausgeübte Druck pflanzt sich also nach allen Richtungen durch die ganze Masse fort und überträgt sich schlieſslich auf die Gefäſswände, gegen welche er überall senkrecht wirkt; denn bringt man irgendwo, sei es im Boden oder in einer Seitenwand des Gefäſses, ein Loch an, so wird die Masse durch dasselbe in einer zur Wand senkrechten Richtung gleichsam herausspritzen. Infolge der noch weit gröſseren Beweglichkeit ihrer Teilchen zeigen Flüssigkeiten diese allseitige Fortpflanzung des Druckes in vollkommenster Weise; für sie gilt daher das **hydrostatische Grundgesetz: Ein auf eine Flüssigkeit ausgeübter Druck pflanzt sich in derselben nach allen Richtungen mit gleicher Stärke fort.** „Mit gleicher Stärke", d. h. durch die ganze gepreſste Flüssigkeitsmenge hindurch hat vermöge des auf sie ausgeübten Druckes jedes Flüssigkeitsteilchen das gleiche Bestreben nach allen Richtungen hin auszuweichen; der Druck, welchen ein beliebiges Stück der Gefäſswand auszuhalten hat, wird daher um so gröſser sein, von einer je gröſseren Anzahl Flüssigkeitsteilchen dasselbe bedrängt wird, d. h. je gröſser das Flächenstück ist. Dieser „hydrostatische" Druck wirkt jedoch nicht nur auf die Gefäſswände, sondern herrscht überall im Innern der Flüssigkeit; ein in dieselbe gebrachtes dünnes Blechstückchen z. B. erleidet **von beiden Seiten her den gleichen seiner Oberfläche proportionalen und zu ihr senkrechten Druck.** Der Druck an irgend einer Stelle einer ruhenden Flüssigkeit wird gemessen durch die daselbst auf die Flächeneinheit wirkende Kraft.

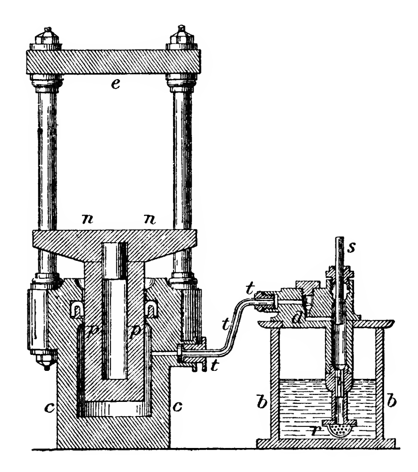



Fig. 56.
Hydraulische Presse.

Eine nützliche Anwendung der allseitig gleichen Fortpflanzung des Druckes im Wasser macht man in der **hydraulischen Presse** (Bramah, 1795). Sie besteht (Fig. 56) aus einem weiten (*cc*) und

aus einem engen Cylinder, welche mit Wasser gefüllt und durch einen Kanal (*tt*) miteinander verbunden sind; den weiten Cylinder verschliefst der Prefskolben (*pp*), der engere enthält einen Pumpenkolben (*s*). Der auf letzteren ausgeübte Druck pflanzt sich durch das Wasser fort, und der Prefskolben wird mit einer Kraft gehoben, welche im Vergleich zu jenem Druck so vielmal gröfser ist, als der Querschnitt des Prefskolbens denjenigen des Pumpenkolbens übertrifft. Der Prefskolben trägt oben eine Platte (*nn*), welche die zu pressenden Gegenstände gegen ein durch starke Pfeiler getragenes festes Widerlager (*e*) drückt. Beim Heben des Pumpenkolbens schliefst sich das Ventil *d*, das Ventil *i* dagegen öffnet sich und läfst aus dem Behälter *bb* durch das Sieb *r* Wasser nachdringen, welches bei dem nächsten Niedergang des Kolbens *s* in den Cylinder *cc* hinübergeprefst wird. Der Pumpenkolben wird mittels eines einarmigen Hebels in Bewegung gesetzt, an dessen längerem Hebelarm der Arbeiter angreift. Angenommen, dieser übe einen Druck von 30 kg aus und der längere Hebelarm sei sechsmal länger als der kürzere, an welchem die Kolbenstange der Pumpe angebracht ist, so geht der Pumpenkolben mit einem Druck von 180 kg herab; ist nun die Stirnfläche des Prefskolbens 100 mal so grofs als diejenige des Pumpenkolbens, so wird jener mit einer Kraft von 18 000 kg in die Höhe gedrückt. Auch für diese Maschine gilt die allgemeine Regel der Mechanik, dafs, was an Kraft gewonnen wird, an Weg verloren geht, oder dafs die bewegende Arbeit der widerstehenden gleich ist.

59. **Wirkung der Schwerkraft.** Wir haben bisher nur die Fortpflanzung eines auf die Flüssigkeit ausgeübten äufseren Druckes betrachtet, ohne auf die Wirkungen Rücksicht zu nehmen, welche die Schwere der Flüssigkeit selbst hervorbringt. Vor allem ist klar, dafs eine in einem oben offenen Gefäfs enthaltene Flüssigkeit nur dann im Gleichgewicht sein kann, wenn ihre freie Oberfläche wagrecht ist, d. h. wenn die Richtung der Schwerkraft auf ihr senkrecht steht, da ja bei jeder anderen Form der Flüssigkeitsoberfläche ein Herabfliefsen eines Teiles der Flüssigkeit von den höheren nach den tieferen Stellen eintreten müfste, bis endlich der wagrechte Flüssigkeitsspiegel hergestellt wäre. Man kann sich ferner leicht überzeugen, dafs auch in zwei (oder mehreren) Gefäfsen, welche unten miteinander in Verbindung stehen (kommunizirende Gefäfse oder Röhren), die Flüssigkeit sich immer in beiden gleichhoch (in dasselbe Niveau) einstellt, so dafs beide Flüssigkeitsspiegel stets in derselben wagrechten Ebene liegen, welche Form auch die Gefäfse haben mögen.

Hierauf gründet sich die Anwendung der Wasserwage (Kanalwage) zum Einvisiren wagrechter Linien (Nivelliren), bestehend aus einem Blechrohr, in dessen lotrecht aufwärts gebogene Enden Glasrohre eingesetzt sind; da in diese kommunizirenden Röhren gegossenes Wasser in beiden Glasröhren sich in die nämliche wagrechte

Ebene einstellt, so ist die Sehlinie eines über beide Wasserspiegel hinblickenden Auges notwendig wagrecht. Als feineres Mittel zum Horizontalstellen von Linien (z. B. der optischen Achsen von Fernrohren) und Ebenen dient die Libelle (Hooke, 1666). Sie besteht aus einem in eine Metallfassung eingeschlossenen, nach der Mitte ein wenig ausgebauchten und bis auf eine Luftblase mit Weingeist oder Äther gefüllten Glasgefäfs von Röhren- oder Dosenform (Röhrenlibelle, Dosenlibelle). Die Luftblase nimmt immer die höchste Stelle des Gefäfses ein; läfst man sie auf die durch geeignete Marken bezeichnete Mitte der Röhre oder Dose einspielen, so steht die Grundfläche der Metallhülse wagrecht.

Betrachten wir nun beispielsweise eine Giefskanne (Fig. 57), welche bis $MN$ mit Wasser gefüllt ist, so wird die Oberfläche des Wassers im Ausgufsrohr bei $N$ genau in derselben wagrechten Ebene liegen wie der Wasserspiegel in der Kanne. Füllt man nun noch mehr Wasser in die Giefskanne bis zum Niveau $PQ$, so mufs, da das unterhalb $MN$ befindliche Wasser nach wie vor sein Gleichgewicht behauptet, die schiefe Wassersäule $NN'Q'Q$ im Ausgufsrohr der in der Kanne über $MM'$ befindlichen Wassersäule $MM'P'P$ das Gleichgewicht halten, d. h. der Druck, welchen jene Wassersäule auf ihre Grundfläche $NN'$ ausübt, und welcher sich durch das darunter befindliche Wasser fortpflanzt, um gegen die Fläche $MM'$ von unten nach oben zu wirken, mufs gleich sein dem Druck, welchen das über $MM'$ befindliche Wasser auf ein gleichgrofses Flächenstück $nn'$ von oben nach unten ausübt. Der Druck, welchen das Flächenstückchen $nn'$ auszuhalten hat, ist aber nichts anderes, als das Gewicht der lotrecht darüber stehenden Wassersäule; demnach ist auch der Druck, welchen die schiefe Wassersäule $NQ$ auf ihre Grundfläche ausübt, gleich dem Gewicht einer lotrechten Wassersäule, welche man über dieser Grundfläche bis zur Ebene des Flüssigkeitsspiegels emporreichend denkt. Der Druck, welchen gleichgrofse Flächenstückchen vermöge der Schwere der Flüssigkeiten erleiden, hängt also nur von der lotrechten Tiefe des betrachteten Flächenstückchens unter dem Flüssigkeitsspiegel ab und ist dieser Tiefe proportional. In einer Flüssigkeitsmasse herrscht also in jeder wagrechten Ebene pro Flächeneinheit der gleiche Druck, und dieser Druck nimmt nach unten hin in demselben Verhältnis wie die Tiefe zu. Solche Flächen gleichen Druckes nennt man Niveauflächen. In Gefäfsen von mäfsiger Ausdehnung erscheinen sie als horizontale Ebenen, sind aber eigentlich kleine Stücke von mit der Erde koncentrischen Kugelflächen.

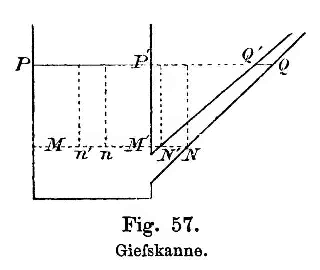


Fig. 57.
Giefskanne.

Giefst man zu Quecksilber, welches den unteren Teil des zweischenkligen Glasrohrs $aec$ (Fig. 58) erfüllt, in den einen Schenkel

Wasser, so sinkt das Quecksilber in diesem und steigt im anderen Schenkel, bis sich Gleichgewicht hergestellt hat. Die durch die Trennungsschicht der beiden Flüssigkeiten gelegte Horizontalebene *ac* ist alsdann eine Fläche gleichen Druckes, unterhalb welcher das Quecksilber für sich schon im Gleichgewicht ist, und auf welche von oben her einerseits die Wassersäule *ab*, andererseits die Quecksilbersäule *cd* pro Flächeneinheit gleichen Druck ausüben. Man findet nun, dafs die Wassersäule vertikal gemessen 13,6 mal höher ist als die Quecksilbersäule, und dafs sonach die Quecksilbersäule ebensoviel wiegt wie eine 13,6 mal höhere Wassersäule von gleicher Grundfläche. Bei gleichem Raumgehalt ist daher Quecksilber 13,6 mal so schwer als Wasser; man nennt diese Zahl sein spezifisches Gewicht (64). Allgemein gilt, dafs zwei verschiedene, nicht mischbare Flüssigkeiten in kommunizirenden Röhren sich das Gleichgewicht halten, wenn ihre von der Trennungsschicht an gerechneten Höhen sich umgekehrt verhalten wie ihre spezifischen Gewichte.

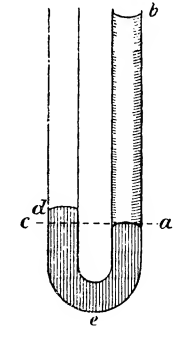
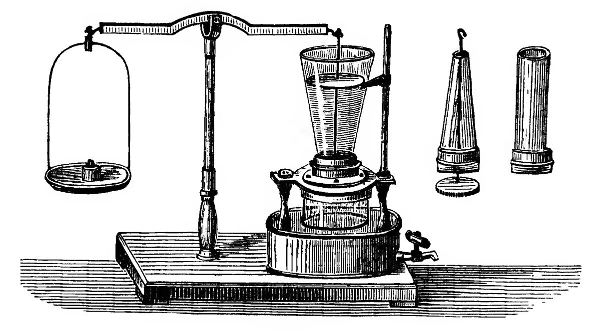


Fig. 58.
Zweischenkliges Glasrohr.

60. **Bodendruck.** Der Druck, welchen eine Flüssigkeit auf den wagrechten Boden eines Gefäfses ausübt, ist, ohne Rücksicht auf die Gestalt des Gefäfses, stets gleich dem Gewicht einer lotrechten Flüssigkeitssäule, welche man sich über dem Boden bis zum Flüssigkeitsspiegel errichtet denkt. In einem Gefäfs, welches sich nach oben erweitert, ist hiernach


Fig. 59.
Hydrostatisches Paradoxon.

der auf den Boden ausgeübte Druck kleiner, in einem nach oben enger werdenden Gefäfs (z. B. in einer Flasche) gröfser als das Gewicht der im Gefäfs enthaltenen Flüssigkeit. Diese Folgerung (Stevin, 1586) erscheint auf den ersten Blick so seltsam, dafs man sie das hydrostatische Paradoxon genannt hat. Ihre Richtigkeit läfst sich aber leicht nachweisen (Pascal, 1653) mittels einer Wage (Fig. 59), deren eine ebengeschliffene Wagschale den Boden

verschieden geformter Gefäſse (z. B. eines geraden cylindrischen, eines oben erweiterten, eines oben verengerten u. s. w.), die man der Reihe nach auf ein Gestell aufschraubt, bilden kann. Bei gleichem Wasserstand braucht man bei dem erweiterten und dem sich verengernden Gefäſs dasselbe Gewicht wie bei dem cylindrischen, um dem Druck der Flüssigkeit gegen die bewegliche Bodenplatte das Gleichgewicht zu halten. Würde man dagegen das Wasser in den Gefäſsen gefrieren lassen, so wäre im Falle des oben engeren Gefäſses ein geringeres Gewicht erforderlich, nämlich nur das der wirklich vorhandenen Eismasse. — Das Gesetz vom Bodendruck kann übrigens auch mittels des zweischenkligen Rohres (Fig. 58) nachgewiesen werden; denn die Quecksilberfläche bei *a* bildet den beweglichen Boden des Gefäſses *ab*; welche Gestalt man diesem auch geben mag, so bleibt die Quecksilbersäule *cd*, welche dem Druck auf *a* das Gleichgewicht hält, unverändert (Haldat).

Vermöge dieses Gesetzes lassen sich durch kleine Flüssigkeitsmengen sehr groſse Druckkräfte ausüben. Indem Pascal (1647) im oberen Boden eines mit Wasser gefüllten Fasses eine 10 m hohe, enge Röhre befestigte und ebenfalls mit Wasser füllte, gelang es ihm, das Faſs zu zersprengen; denn der Druck auf den Boden des Fasses ist gleich dem Gewichte einer Wassersäule, welche man sich mit einem dem Boden des Fasses gleichen und gleichbleibenden Querschnitt bis an das obere Ende der Röhre emporreichend denkt.

In der Realschen Extraktpresse findet dieses Verhalten praktische Verwertung zum Auslaugen pflanzlicher Stoffe unter starkem Flüssigkeitsdruck. Die feingepulverte Substanz befindet sich zwischen zwei siebartig durchlöcherten Platten in einem weiteren Gefäſs, in dessen Deckel ein sehr langes enges Rohr eingesetzt ist, welches wie das Gefäſs mit der zum Auslaugen bestimmten Flüssigkeit angefüllt wird. Die Substanz erleidet alsdann denselben Druck, als ob die Wände des weiteren Gefäſses bis zu gleicher Höhe wie die Röhre emporragten und ebenso hoch wie diese mit Flüssigkeit gefüllt wären.

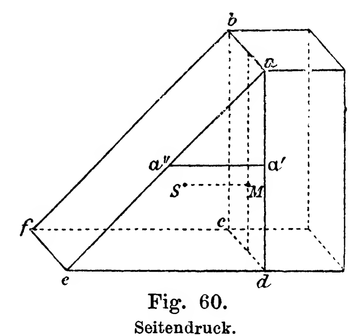


Fig. 60.
Seitendruck.

61. **Seitendruck.** Auf jedes kleine Flächenstückchen der vertikalen Seitenwand eines mit Flüssigkeit gefüllten Gefäſses wirkt senkrecht zu ihm, also in horizontaler Richtung, ein Druck gleich dem Gewichte einer Flüssigkeitssäule, die das Flächenstückchen zur Grundfläche und seine Tiefe unter dem Flüssigkeitsspiegel zur Höhe hat. In der Zeichnung (Fig. 60) kann daher der Druck an irgend einer Stelle ($a'$) der Gefäſswand durch eine horizontale Linie $a'a''$ dargestellt werden, deren Länge gleich der Tiefe $aa'$ dieser Stelle unter der Oberfläche ist. Diese Konstruktion läſst erkennen, daſs die recht-

eckige Seitenwand *abcd* eines Gefäfses einen horizontalen Druck derart erleidet, als wenn sie, horizontal gelegt, mit dem keilförmigen Flüssigkeitsprisma *abcdef* belastet wäre. Eine vom Schwerpunkt *S* dieses Prismas auf die Gefäfswand gefällte Senkrechte gibt den Punkt *M* an, in welchem dieser Druck, als Resultante aus den unzählig vielen auf die Flächenteilchen wirkenden Einzeldrucken, angreift. In unserem Beispiel liegt dieser Punkt, welchen man den Mittelpunkt des Druckes nennt, auf der vertikalen Mittellinie des Rechtecks um $^1/_3$ der Gesamttiefe über dem Boden.

62. **Auftrieb.** Der durch die Schwere in einer Flüssigkeit hervorgerufene Druck wirkt nicht nur nach unten und seitwärts, sondern auch nach aufwärts, als sogenannter Auftrieb. Um diesen nach oben wirkenden Druck nachzuweisen, kann man sich eines weiten, beiderseits offenen Glasrohres bedienen, dessen unteres eben abgeschliffenes Ende mittels einer ebenen Metallscheibe verschlossen werden kann; dies geschieht, indem man die Scheibe mittels eines in ihrer Mitte befestigten, durch das Rohr hinaufgehenden Fadens gegen dessen unteren Rand anprefst. Taucht man nun das Rohr mit dem so verschlossenen Ende voran in Wasser, so wird die Scheibe, wenn man den vorher angespannten Faden losläfst, doch nicht abfallen, weil sie nun durch den Auftrieb gegen den Rand des Rohres gedrückt wird. Giefst man jetzt Wasser in das Rohr, so fällt die Scheibe erst ab, wenn das Wasser im Innern nahezu dieselbe Höhe erreicht hat wie aufserhalb, nämlich dann, wenn der Wasserdruck von oben zusammen mit dem Gewichte der Scheibe den Druck von unten her zu übertreffen beginnt.

63. **Archimedisches Gesetz.** Wird ein Körper, z. B. ein gerader Cylinder mit wagrechten Endflächen (*ABCD*, Fig. 61), unter eine Flüssigkeit getaucht, so erleidet jedes Teilchen seiner Oberfläche einen seiner Tiefe unter dem Flüssigkeitsspiegel entsprechenden Druck. Die auf die Seitenflächen wirkenden wagrechten Druckkräfte, welche paarweise einander gleich und entgegengesetzt sind, heben sich gegenseitig auf; dagegen ist der Druck, welcher auf die untere Endfläche nach aufwärts wirkt, gröfser als der Druck, den die obere Endfläche nach abwärts erleidet; jener ist nämlich gleich dem Gewichte einer Flüssigkeitssäule (*ABEF*), welche sich von der unteren, dieser gleich dem Gewichte einer Säule (*CDEF*), welche sich von der oberen Endfläche bis zum Spiegel erhebt. Es bleibt also ein nach aufwärts gerichteter Druck übrig, welcher dem Überschufs des ersteren Gewichtes über das letztere oder, was dasselbe ist, dem Gewichte einer Flüssigkeitssäule (*ABCD*) gleichkommt, welche denseiben Raum einnimmt wie der untergetauchte Körper. Dieser nach aufwärts gerichtete Druck wirkt dem Gewichte des Körpers entgegen und läfst denselben daher um so viel leichter erscheinen. Wir sind hiermit zu dem nach seinem Entdecker benannten Archimedischen Prinzip gelangt: Ein in eine Flüssigkeit ge-

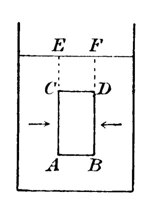


Fig. 61.
Archimedisches Prinzip.

tauchter Körper verliert durch den Druck der umgebenden Flüssigkeit scheinbar so viel von seinem Gewichte, als das Gewicht der von ihm verdrängten Flüssigkeitsmenge beträgt. Um diesen Satz durch einen Versuch zu bestätigen, bedient man sich der hydrostatischen Wage (Fig. 62), d. h. einer Wage, deren eine Schale unten mit einem Häkchen versehen und kürzer aufgehängt ist, um ein Gefäſs mit Flüssigkeit darunter stellen zu können; an das Häkchen hängt man mittels eines feinen Drahtes einen Metallcylinder und stellt auf die Wagschale einen Hohlcylinder, welcher von jenem massiven Cylinder genau ausgefüllt wird; während dieser frei in der Luft schwebt, bringt man die Wage durch Gewichte, welche man auf die andere Seite legt, ins Gleichgewicht. Taucht man nun den Cylinder in das Wasser eines untergestellten Gefäſses, so verliert er an Gewicht, und die kürzere Wagschale steigt; das Gleichgewicht stellt sich aber vollkommen wieder her, wenn man den auf der Wagschale stehenden Hohlcylinder bis zum Rande mit Wasser füllt. Man sieht also, daſs der Gewichtsverlust des untergetauchten Körpers durch das Gewicht einer Flüssigkeitsmenge von gleichem Rauminhalte genau aufgewogen wird.

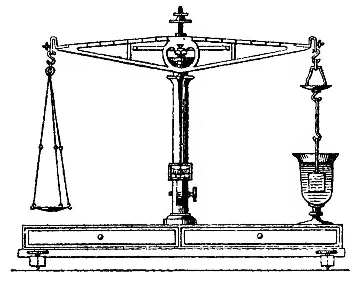


Fig. 62.
Hydrostatische Wage.

Man stelle ferner ein mit Wasser gefülltes Gefäſs auf die eine Schale einer gewöhnlichen Wage, den leeren Hohlcylinder nebst Tara bis zum Einspielen auf die andere Schale, und senke den an einem festen Ständer aufgehängten Vollcylinder in das Wasser. Obgleich das Gewicht des Cylinders von dem Ständer völlig getragen wird, senkt sich die Wage auf dieser Seite; das Gleichgewicht wird aber wieder hergestellt, wenn man den Hohlcylinder auf der anderen Seite mit Wasser vollfüllt. Taucht man also einen Körper in eine Flüssigkeit, so gewinnt diese scheinbar soviel an Gewicht, als das Gewicht der verdrängten Flüssigkeit beträgt (Umkehrung des Archimedischen Satzes). Es steigt nämlich das Wasser im Gefäſs so hoch, als ob man bei Abwesenheit des Körpers eine ihm an Rauminhalt gleiche Wassermenge zugegossen hätte, und der eingetauchte Körper, indem er dem Druck der umgebenden Flüssigkeit allseitig einen gleichgroſsen Gegendruck entgegensetzt, wirkt wie ein an seiner Stelle befindliches gleichgroſses Stück Wasser.

Der Archimedische Satz gilt übrigens nicht bloſs für cylindrische oder prismatische, sondern für beliebig gestaltete Körper; denn man kann jeden Körper in dünne vertikale Prismen zerlegt denken, für deren jedes der Satz gilt, und demnach auch für ihre Gesamtheit. Mit völliger Allgemeinheit ergibt er sich auch aus folgender Überlegung. Wenn ein Körper vom Gewicht $P$ in einer Flüssigkeit um

die Strecke $h$ herabsinkt, so wird gleichzeitig ein gleiches Volumen Flüssigkeit vom Gewicht $Q$ ebenso hoch gehoben, und die Fallarbeit $Ph$ des Körpers allein wird um die zu dieser Hebung erforderliche Arbeit $Qh$ vermindert. Die schliefslich geleistete Arbeit ist also dieselbe, als ob der Körper mit dem Gewicht $P—Q$ durch die Strecke $h$ frei herabgefallen wäre.

64. **Bestimmung des Volumens. Spezifisches Gewicht (Dichte).** Hängt man an die kürzere Schale der hydrostatischen Wage mittels eines feinen Drahtes oder Haares einen Körper (welcher für sich im Wasser untersinken würde), so geben die Gewichtsstücke, welche man bis zum Einspielen der Wage auf die andere Schale legen mufs, das Gewicht des Körpers (in Grammen) an. Nun werde der Körper in Wasser getaucht und die Wage durch Auflegen von Gewichtsstücken auf die kürzere Schale ins Gleichgewicht gebracht; die hier aufgelegten Gewichte geben den erlittenen Gewichtsverlust, d. h. das Gewicht einer dem Körper an Rauminhalt gleichen Wassermenge an; da jedes Kubikcentimeter Wasser 1 g wiegt, so beträgt das verdrängte Wasser, also auch der Rauminhalt des untergetauchten Körpers selbst, so viele Kubikcentimeter, als der Gewichtsverlust Gramm beträgt (vorbehaltlich einer kleinen Korrektur wegen der Ausdehnung des Wassers durch die Wärme); auf diese Weise läfst sich also der Rauminhalt (das Volumen) eines noch so unregelmäfsig gestalteten Körpers mit grofser Genauigkeit ermitteln. Durch dasselbe Verfahren ergibt sich auch sofort das spezifische Gewicht des Körpers, d. h. das Verhältnis seines Gewichtes zu dem Gewicht eines gleichen Volumens Wasser, oder die Zahl, welche angibt, wievielmal der Körper schwerer ist, als ein gleiches Volumen Wasser von 4° C.; man braucht ja nur, um diese Verhältniszahl zu finden, das Gewicht des Körpers, welches durch die auf der tiefer hängenden Wagschale liegenden Gewichte gegeben ist, zu dividiren durch den Gewichtsverlust, welcher durch die auf die kürzer aufgehängte Schale aufgelegten Gewichte dargestellt ist. Auch das spezifische Gewicht von Flüssigkeiten läfst sich mittels der hydrostatischen Wage leicht finden. Man bringt nämlich einen unter der kürzeren Wagschale aufgehängten beliebigen Körper, z. B. ein Glasstück, in der Luft durch auf die andere Wagschale gelegte Gewichte (Tara) ins Gleichgewicht und bestimmt nun seinen Gewichtsverlust zuerst in der zu untersuchenden Flüssigkeit und dann in Wasser; jener Verlust, durch diesen dividirt, gibt das gesuchte spezifische Gewicht. Die Gewichtsverluste, welche ein und derelbe Körper in verschiedenen Flüssigkeiten erleidet, stehen offenbar in demselben Verhältnis wie deren spezifische Gewichte. Auf diesen Satz gründet sich die Mohrsche Wage (Fig. 63); an dem einen Arm des Wagebalkens hängt mittels eines feinen Platindrahtes das Senkgläschen $A$, ein zugeschmolzenes, zum Teil mit Quecksilber gefülltes oder ein kleines Thermometer enthaltendes Glasröhrchen, welches durch die Wagschale $B$ gerade im Gleichgewicht gehalten wird. Die Gewichte bestehen aus hakenförmig gebogenen Messing-

drähten $P$, von denen zwei gleichviel und zwar genau so viel wiegen, als der Gewichtsverlust des Senkgläschens im Wasser ausmacht, während ein drittes $^1/_{10}\,P$, ein viertes $^1/_{100}\,P$ wiegt. Der Arm des Wagebalkens, an welchem das Senkgläschen hängt, ist in zehn gleiche Teile geteilt. Will man nun das spezifische Gewicht einer Flüssigkeit bestimmen, so bringt man dieselbe in das Standgefäſs $CC$ und taucht das Senkgläschen in sie ein. Ist die Flüssigkeit z. B. koncentrirte Schwefelsäure, so muſs man, um das Gleichgewicht herzustellen, das eine Gewicht $P$ an das Ende $h$ des Wagebalkens, das andere Gewicht $P$ bei 8, das Gewicht $^1/_{10}\,P$ bei 4 und das Gewicht $^1/_{100}\,P$ wieder bei 8 anhängen und hat hiemit das spezifische Gewicht der Schwefelsäure $= 1{,}848$ gefunden. Auch die Jollysche Federwage (52) kann bequem zur Bestimmung des spezifischen Gewichtes kleiner Körper gebraucht werden, wenn unter dem Wagschälchen ein zweites aufgehängt ist, das in ein untergestelltes Gefäſs mit Wasser taucht. Legt man den Körper in das obere Schälchen, so erleidet der schraubenförmig gewundene Draht eine dem Gewicht des Körpers

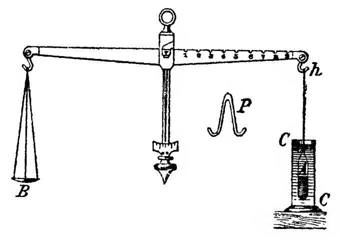



Fig. 63.
Mohrsche Wage.

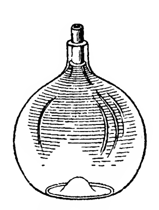


Fig. 64.
Pyknometer.

proportionale Verlängerung; bringt man ihn sodann in das untere Schälchen, so verkürzt sich der Draht wieder um eine dem Gewichtsverlust des nun in Wasser getauchten Körpers proportionale Länge. Jene Verlängerung dividiert durch diese Verkürzung gibt das gesuchte spezifische Gewicht. Um auch die spezifischen Gewichte von Flüssigkeiten zu finden, hängt man unter das Wagschälchen ein Senkgläschen; die Verkürzungen, welche die Drahtspirale beim Eintauchen des Senkgläschens in verschiedene Flüssigkeiten erfährt, verhalten sich wie deren spezifische Gewichte.

Aber auch ohne Benutzung des Archimedischen Prinzips kann man das spezifische Gewicht von Flüssigkeiten und festen Körpern bestimmen (und zwar sehr genau) mit Hilfe des Pyknometers (Tarirfläschchens), einen 8 bis 20 ccm fassenden Glasfläschchens (Fig. 64), dessen eingeriebener Stöpsel aus einem Stück Thermometerröhre verfertigt ist, damit bei etwaiger Erwärmung ein Teil der Flüssigkeit durch die feine Öffnung austreten könne, ohne den Stöpsel zu heben oder das Gefäſs zu gefährden. Wägt man das tarirte Fläschchen zuerst mit der Flüssigkeit, deren spezifisches Gewicht bestimmt werden soll, sodann mit Wasser gefüllt, so erfährt

man das spezifische Gewicht sofort durch Division des ersten Gewichtes durch das zweite. Zur Bestimmung des spezifischen Gewichtes fester Körper wägt man zuerst das Fläschchen mit Wasser gefüllt, legt den in Stückchen von Schrotgröfse zerkleinerten Körper daneben auf die nämliche Wagschale, bringt die Wage abermals zum Einspielen und erfährt dadurch sein Gewicht. Wirft man nun die Stückchen in das Fläschchen, so mufs notwendig soviel Wasser ausfliefsen, als von den hineingeworfenen Stückchen verdrängt wird, und man erfährt durch eine abermalige Wägung des sorgfältig abgetrockneten Fläschchens, wieviel eine den Körperstückchen an Rauminhalt gleiche Wassermenge wiegt.

Die folgende Tabelle enthält die spezifischen Gewichte einiger fester und flüssiger Körper.

A. Feste Körper:

| | |
|---|---|
| Iridium | 22,4 |
| Platin (gewalzt) | 21,50 |
| Gold (gehämmert) | 19,36 |
| Blei (gegossen) | 11,35 |
| Silber (gegossen) | 10,47 |
| Kupfer (gegossen) | 8,79 |
| Messing | 8,38 |
| Eisen (geschmiedet) | 7,79 |
| Eisen (gegossen) | 7,21 |
| Zinn (gegossen) | 7,29 |
| Zink (gegossen) | 7,10 |
| Antimon | 6,72 |
| Schwerspat | 4,48 |
| Diamant (höchstens) | 3,53 |
| Flintglas | 3,33 |
| Flufsspat | 3,15 |
| Marmor | 2,84 |
| Kalkspat | 2,70 |
| Bergkrystall | 2,68 |
| Aluminium | 2,67 |
| Flaschenglas | 2,64 |
| Spiegelglas | 2,45 |
| Porzellan | 2,40 |
| Gips (krystalliert) | 2,31 |
| Schwefel (natürlich) | 2,03 |
| Elfenbein | 1,92 |
| Phosphor | 1,77 |
| Magnesium | 1,74 |
| Buchsbaumholz | 1,33 |
| Ebenholz | 1,23 |
| Eichenkernholz | 1,17 |
| Bernstein | 1,08 |
| Wachs, weifses | 0,97 |
| Natrium | 0,97 |
| Eis | 0,92 |
| Kalium | 0,87 |
| Buchenholz | 0,80 |
| Lindenholz | 0,60 |
| Lithium | 0,59 |
| Pappelholz | 0,38 |
| Kork | 0,24 |

B. Flüssige Körper:

| | |
|---|---|
| Quecksilber | 13,596 |
| Schwefelsäure (koncentrirt) | 1,84 |
| Salpetersäure | 1,54 |
| Chloroform | 1,48 |
| Schwefelkohlenstoff | 1,27 |
| Glycerin | 1,26 |
| Salzsäure | 1,21 |
| Milch | 1,03 |
| Meerwasser | 1,02 |
| Leinöl | 0,95 |
| Olivenöl | 0,91 |
| Petroleum | 0,89 |
| Terpentinöl | 0,87 |
| Benzol | 0,87 |
| Alkohol | 0,79 |
| Äther | 0,74 |

Mit dem Ausdruck „Dichte“ bezeichnet man die Masse der Volumeneinheit eines Körpers. Im absoluten Mafssystem, in dem die Masse eines Kubikcentimeters Wasser als Masseneinheit gilt, bezeichnen die obigen Zahlen auch unmittelbar die Dichten.

Spezifisches Volumen heifst das Volumen der Masseneinheit; es ist sonach der umgekehrte Wert der Dichte.

65. **Schwimmen.** Ein untergetauchter Körper, dessen Gewicht demjenigen der verdrängten Flüssigkeitsmenge genau gleich ist, verliert

sein ganzes Gewicht und **schwebt** daher in der Flüssigkeit ohne Bestreben, zu sinken, oder zu steigen; ist sein Gewicht gröſser, so wird er untersinken; ist es kleiner als dasjenige der verdrängten Flüssigkeit, so steigt er in die Höhe, taucht teilweise aus der Oberfläche empor und **schwimmt** nun an der Oberfläche, sobald der Auftrieb von seiten der Flüssigkeit, nämlich das Gewicht der von seinem untergetauchten Teil verdrängten Flüssigkeitsmenge, dem ganzen Gewicht des Körpers gleich und dieses sonach zu tragen im stande ist. Dieser Satz kann mit Hilfe des Gefäſses Fig. 65, welches mit einem seitlichen Abfluſsröhrchen versehen ist, leicht bewiesen werden. Nachdem das Gefäſs bis zur inneren Öffnung des Röhrchens mit Wasser gefüllt ist, senkt man den schwimmenden Körper langsam und vorsichtig ein; durch das Röhrchen wird alsdann das verdrängte Wasser in ein untergestelltes Becherglas abflieſsen. Bringt man jetzt dieses Glas, welches vorher tarirt worden, auf die eine, den abgetrockneten Schwimmer auf die andere Schale einer Wage, so spielt dieselbe ein und zeigt somit, daſs

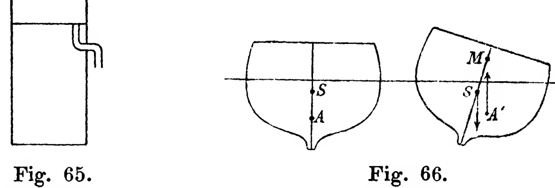



Fig. 65.
Zum Schwimmen der Körper.

Fig. 66.
Metacentrum.

der schwimmende Körper ebenso schwer ist wie das von seinem untergetauchten Teil verdrängte Wasser.

Das nach abwärts ziehende Körpergewicht greift im Schwerpunkt *S* (Fig. 66) des schwimmenden Körpers, der Auftrieb im Schwerpunkt *A* der verdrängten Flüssigkeit an. Diese beiden entgegengesetzt gleichen Kräfte heben sich auf, und der Körper schwimmt im Gleichgewicht, wenn diese beiden Punkte in derselben Vertikalen liegen. Sie bilden dagegen ein Kräftepaar, welches den Körper zu drehen sucht, wenn man ihn aus der Gleichgewichtslage herausbringt; dabei bleibt der Schwerpunkt des Körpers an seiner Stelle (z. B. bei einem Schiff, dessen Querschnitt Fig. 66 darstellt, in *S* auf der nunmehr geneigten Mittellinie), der Schwerpunkt der verdrängten Wassermenge, die nun eine andere Gestalt angenommen hat, rückt seitwärts nach *A'*. Trifft die durch *A'* gezogene Vertikale die Mittellinie in einem Punkte *M* oberhalb des Schwerpunktes *S*, so ist ersichtlich, daſs das Kräftepaar den Körper in die frühere Lage zurückzudrehen sucht; der Körper schwimmt im stabilen Gleichgewicht. Liegt dagegen *M* unterhalb *S*, so wird der Körper durch das Kräftepaar umgestürzt und sucht eine neue Gleichgewichtslage auf. Den Schnittpunkt *M* der Richtung des Auftriebs mit der Mittellinie nennt man das **Metacentrum**. Das Gleichgewicht des schwimmenden Körpers ist stabil, wenn sein Schwerpunkt unter dem Metacentrum, labil, wenn

er oberhalb liegt, und indifferent, wenn das Metacentrum mit dem Schwerpunkt zusammenfällt, wie z. B. bei einer homogenen Kugel.

66. **Aräometer.** Man kann das verschieden tiefe Eintauchen eines und desselben Körpers beim Schwimmen in verschiedenen Flüssigkeiten benutzen, um das spezifische Gewicht der Flüssigkeiten zu messen. Derartige Vorrichtungen nennt man Aräometer oder Senkwagen. Die gebräuchlichen Skalenaräometer (Fig. 67) bestehen aus einem hohlen cylindrischen Glaskörper, der mit Schrot oder Quecksilber passend beschwert ist und nach oben in eine überall gleich dicke cylindrische Röhre ($x$) ausläuft. In dieser Röhre befindet sich die Skala, an der man die Tiefe des Eintauchens abliest. Sie kann in verschiedener Weise geteilt werden. Bei dem Volumeter von Gay-Lussac ist derjenige Punkt, bis zu dem das Instrument in Wasser eintaucht, mit 100 bezeichnet und die Röhre so geteilt, dafs der zwischen zwei Teilen enthaltene Raumteil ein Hundertel von dem im Wasser eingetauchten Rauminhalt beträgt. Sinkt daher das Instrument in einer Flüssigkeit bis zum Teilstrich 80 ein, so weifs man, dafs 80 Raumteile dieser Flüssigkeit ebensoviel wiegen wie 100 Raumteile Wasser, ihr spezifisches Gewicht also $100:80 = 1,25$ ist. Würde in einer Flüssigkeit, welche leichter als Wasser ist, das Instrument bis zum Teilstrich 110 einsinken, so wäre hiernach ihr spezifisches Gewicht: $100:110 = 0,909$. Bequemer ist es, die Skala so zu teilen, dafs sie unmittelbar die spezifischen Gewichte angiebt; bei solchen Aräometern, welche man Densimeter nennt, sind die Teilstriche nicht mehr gleich weit voneinander entfernt, sondern rücken nach dem unteren Ende der Skala immer näher zusammen. Im täglichen Verkehr wünscht man durch das Aräometer nicht sowohl das spezifische Gewicht einer Flüssigkeit zu erfahren, als vielmehr den Prozentgehalt derselben an denjenigen Bestandteilen, welche ihren Kaufwert bedingen. Der käufliche Weingeist z. B. ist ein Gemisch von Wasser und Alkohol und ist um so wertvoller, je mehr Prozente von letzterem er enthält. Zu seiner Prüfung verfertigt man daher Aräometer, deren Skala unmittelbar die Prozente Alkohol angeben, und nennt dieselben Alkoholometer. Solche Prozentaräometer sind unter dem Namen Alkalimeter, Säuremesser, Salzspindeln, Milchwagen, Mostwagen etc. im Gebrauch; jedes derselben kann natürlich nur zur Untersuchung derjenigen Flüssigkeit dienen, für welche es besonders verfertigt ist. Aufser den genannten gibt es noch Aräometer mit willkürlicher Skala, deren Teilstriche man „Grade“ nennt. Dahin gehören namentlich die Aräometer von Beaumé, Beck, Cartier u. a., welche unmittelbar weder über das spezifische Gewicht, noch über den Prozentgehalt der Flüssigkeit Auskunft geben; um diese zu erfahren, mufs man sich einer Tabelle bedienen; gleichwohl sind dieselben am weitesten verbreitet. — Da das spezifische



Fig. 67. Skalenaräometer.

Gewicht der Flüssigkeiten mit der Temperatur sich ändert, so sind die Angaben der Aräometer selbstverständlich nur bei derjenigen Temperatur richtig, bei welcher sie verfertigt sind, und welche daher auf dem Instrument angegeben sein mufs. Um zugleich die Temperatur der untersuchten Flüssigkeit ablesen und danach die Angabe des Aräometers verbessern zu können, ist häufig ein Thermometer in dasselbe eingeschmolzen, dessen Kugel zugleich das beschwerte untere Ende des Aräometers bildet.

Die Gewichtsaräometer sind Schwimmkörper mit einem dünnen mit einer Marke versehenen Hals, der oben ein zur Aufnahme von Gewichten bestimmtes Schälchen trägt. Mufs man nun, damit das Instrument bis zur Marke in Wasser einsinkt, ein gewisses Gewicht auflegen, so gibt dieses Gewicht, zu dem vorher bestimmten Gewicht des ganzen Instruments hinzugezählt, das Gewicht des von dem untergetauchten Teil verdrängten Wassers an. Um das Aräometer in einer anderen Flüssigkeit bis zu derselben Marke einsinken zu machen, mufs man ein anderes Gewicht auflegen, welches, mit demjenigen des Instruments vereinigt, das Gewicht eines gleichen Volumens dieser Flüssigkeit angibt, deren spezifisches Gewicht sonach gefunden wird, wenn man die letztere Zahl durch die erstere dividirt. Das Nicholsonsche Gewichtsaräometer (Fig. 68) dient zur Bestimmung des spezifischen Gewichts fester Körper. Um das Instrument bis zur Marke *c* in Wasser einsinken zu machen, mufs auf das Schälchen *d* ein gewisses Gewicht aufgelegt werden. Bringt man nun den zu untersuchenden Körper, der leichter sein mufs als das vorhin erforderliche Gewicht, auf das Schälchen, so mufs man noch Gewichtsstücke auflegen, um abermals das Eintauchen bis zur Marke zu erzielen; zieht man diese von jenem Gewicht ab, so erfährt man das Gewicht des Körpers. Derselbe wird jetzt in das Körbchen *b* unter Wasser gebracht und verliert nun kraft des Archimedischen Prinzips soviel von seinem Gewicht, wie das von ihm verdrängte Wasser wiegt. Die Gewichte, welche man auf dem Schälchen zulegen mufs, um das Instrument wieder bis zur Marke einzusenken, geben demnach das Gewicht eines mit dem Körper gleichen Volumens Wasser an, mit welchem man nur das vorher ermittelte Gewicht des Körpers zu dividiren braucht, um sein spezifisches Gewicht zu erfahren.

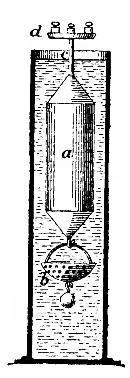


Fig. 68. Nicholsons Aräometer.

67. **Ausfliefsen der Flüssigkeiten.** Bringt man in der Wand eines mit Flüssigkeit gefüllten Gefäfses an einer Stelle, auf die die Flüssigkeit mit dem Drucke $P$ drückt, eine Öffnung an, so spritzt die Flüssigkeit durch sie heraus mit einer Geschwindigkeit, die um so gröfser ist, je gröfser $P$ ist, wie wir an jeder Wasserspritze beobachten. Man kann sich die Abhängigkeit der Geschwindigkeit von dem Drucke leicht durch folgende Überlegung klar machen. Der

Druck der Flüssigkeit prefst die in der Öffnung enthaltene Flüssigkeitsmenge durch die Öffnung hindurch und leistet dabei eine gewisse Arbeit. Ist $P$ der Druck, d. h. die auf die Flächeneinheit wirkende Kraft, und ist $\omega$ der Querschnitt der Öffnung, $\varepsilon$ die Dicke der Wand, so ist $P\omega$ die auf die Flüssigkeit in der Öffnung wirkende Kraft, $P\omega\varepsilon$ die Arbeit bei der Verschiebung dieser Flüssigkeitsmasse durch die Wand hindurch. Diese Arbeit erzeugt die lebendige Kraft, mit der die Flüssigkeit aus der Öffnung heraustritt. Ist $s$ das spezifische Gewicht der Flüssigkeit, so ist $s\omega\varepsilon$ die Masse der Flüssigkeit in der Öffnung, und ist $v$ die Austrittsgeschwindigkeit, so ist

$$\tfrac{1}{2} s\omega\varepsilon v^2 = P\omega\varepsilon$$

oder

$$v = \sqrt{\frac{2P}{s}}\,.$$

Rührt der Druck $P$ von dem Gewicht der über der Öffnung liegenden Flüssigkeitssäule von der Höhe $h$ her, so ist $P = hsg$ und daher

$$v = \sqrt{2gh}.$$

Die Ausflufsgeschwindigkeit einer Flüssigkeit unter der Wirkung ihrer eigenen Schwere ist also gleich der Geschwindigkeit, welche ein freifallender Körper erlangen würde, wenn er vom Flüssigkeitsspiegel bis zum Niveau der Öffnung herabfiele. Nach diesem von Torricelli (1644) entdeckten Satze ist die Ausflufsgeschwindigkeit nur von der Druckhöhe abhängig und der Quadratwurzel derselben proportional, dagegen unabhängig von der Beschaffenheit der Flüssigkeit, so dafs z. B. Weingeist, Wasser, Quecksilber bei gleicher Höhe des Flüssigkeitsstandes gleich schnell ausfliefsen. Diese Folgerungen werden durch die Erfahrung bestätigt.

Läfst man den Flüssigkeitsstrahl mittels einer in die Ausflufsöffnung eingesetzten, nach oben umbogenen Röhre aufwärts strömen (Springbrunnen), so sollte nach Torricellis Lehrsatz der Strahl bis zu der Druckhöhe, von welcher die Flüssigkeit herabkommt, emporspringen; er erreicht jedoch kaum $^9/_{10}$ dieser Höhe, da Reibung an der Wand der Röhre, Luftwiderstand und die zurückfallenden Tropfen die Geschwindigkeit vermindern.

Die Ausflufsmenge pro Sekunde wird in Kubikcentimetern ausgedrückt gefunden, wenn man den in Quadratcentimetern gegebenen Querschnitt der Öffnung mit der nach dem obigen Gesetz aus der Druckhöhe in Centimetern berechneten Ausflufsgeschwindigkeit multiplizirt. Die wirkliche Ausflufsmenge beträgt aber nur etwa $^2/_3$ (genauer 62 Proz.) von der so berechneten, weil der ausfliefsende Strahl nicht den Querschnitt der Öffnung behält, sondern sich infolge der im Gefäfs stattfindenden seitlichen Zuströmung der Flüssigkeit nach dem Austritt bis zu einem Querschnitt von etwa

$^2/_3$ der Öffnung zusammenzieht (Zusammenziehung des Flüssigkeitsstrahls, Contractio venae).

68. **Ausfliefsen durch Röhren.** Der Torricellische Satz gilt nur für das Ausströmen durch Öffnungen in dünner Wand, deren Ränder keinen erheblichen Reibungswiderstand verursachen. Strömt die Flüssigkeit z. B. durch eine am Boden angebrachte horizontale Röhre (Fig. 69) aus, so nimmt der Druck bei gleichförmigem Fliefsen vom Ansatzpunkte *a* der Röhre bis zu ihrer Mündung *o* gleichmäfsig ab, wie man an dem Stand der Flüssigkeit in den vertikalen Röhren erkennt, welche in die horizontale Röhre in gleichen Abständen eingesetzt sind; denn die Gipfel der Flüssigkeitssäulen liegen in der geraden Linie *ob*, so dafs auf gleich lange Rohrstücke gleiche Druckunterschiede kommen, welche die Fallarbeit liefern, die zur Überwindung der Reibung in jedem Rohrstück erfoderlich ist. Demnach wird die Fallarbeit durch die Höhe *ab* (Widerstandshöhe) zur Überwindung des Reibungswiderstandes in der ganzen Röhre verbraucht, und nur die Fallarbeit durch die noch darüber befindliche Höhe *bc* (Geschwindigkeitshöhe) erzeugt die Wucht der ausströmenden Flüssigkeit.

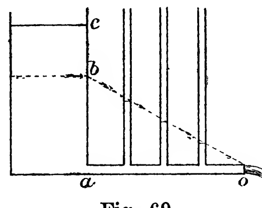


Fig. 69.
Ausfliefsen durch eine Röhre.

69. **Reaktion ausströmender Flüssigkeiten.** Bringt man in der Seitenwand eines mit Flüssigkeit gefüllten Gefäfses eine Ausflufsöffnung an, so vermindert sich der Druck der Flüssigkeit auf diese Wand um denjenigen Anteil, welcher auf den Querschnitt der Öffnung treffen würde, während die gegenüberliegende Wand noch den vollen Druck der Flüssigkeit erleidet. Es bleibt also ein Überschufs von Druck auf letztere Wand, vergleichbar dem Rückstofs eines Geschützes, übrig, welcher dem Druck, der die Flüssigkeit ausströmen macht, als Gegenwirkung (Reaktion) gleichkommt, und das Gefäfs, wenn dasselbe beweglich, z. B. auf einen Schwimmer von Kork aufgesetzt ist, in einer der Ausströmung entgegengesetzten Richtung zurücktreibt. Hierauf beruht das Segnersche Reaktionsrad (Fig. 70); an einem um eine lotrechte Achse drehbaren Gefäfs (*A*) sind unten wagrechte Ansatzröhren mit seitlichen Öffnungen angebracht; giefst man Wasser in das Gefäfs, so dreht es sich in der den ausströmenden Wasserstrahlen entgegengesetzten Richtung. Nach denselben Grundsätzen gebaute Reaktionsräder werden uuter dem Namen Reaktionsturbinen oder schottische Turbinen als Wasser-

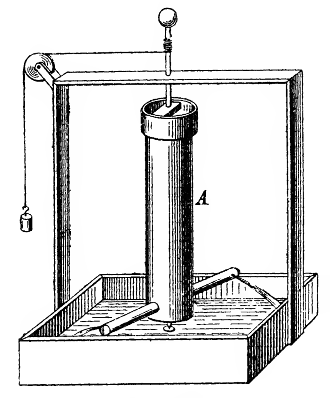


Fig. 70.
Segners Reaktionsrad.

motoren mit Erfolg in Anwendung gebracht. Die gewöhnlichen Turbinen sind wagrechte, unter dem Wasserspiegel des Gefälles liegende Wasserräder. Die Fourneyronsche Turbine (Fig. 71) besteht aus zwei koncentrisch ineinander liegenden Rädern, von welchen

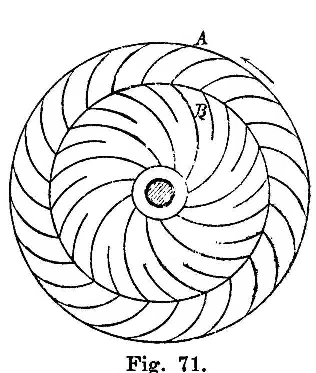



Fig. 71.
**Fourneyrons Turbine.**

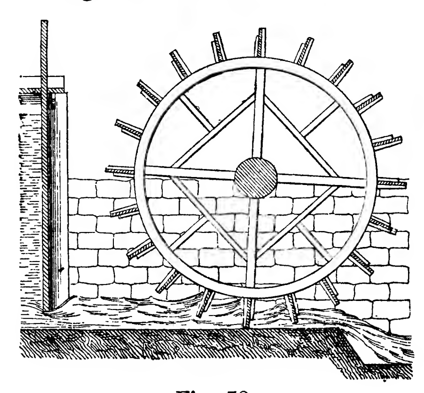


Fig. 72.
**Unterschlächtiges Wasserrad.**

das innere festliegende, das Leitrad *B*, das von oben zufliefsende Wasser entlang seinen gekrümmten Schaufeln senkrecht gegen die ebenfalls gekrümmten Schaufeln des Turbinrades *A* leitet. Dieses wird durch den Stofs des ankommenden und den Rückstofs des an seinem Rand ausströmenden Wassers in der Richtung des Pfeils umgedreht.

70. **Wassermotoren.** Durch die gewöhnlichen vertikalen Wasserräder mit horizontaler Achse wird die Wucht herabfliefsenden Wassers in diejenige einer Achsendrehung umgesetzt. Das unterschlächtige Wasserrad (Figur 72) trägt an seinem Umfang Schaufeln, mit welchen es unten in das Gerinne taucht. Es wird durch den Stofs des fliefsenden Wassers gegen die Schaufeln in Bewegung gesetzt, indem dieses einen Teil seiner beim Herabfliefsen erlangten Geschwindigkeit an das Rad abgibt. Man benutzt es vorzugsweise, wenn eine grofse Wassermenge von geringem Gefälle zu Gebote steht. Beim oberschlächtigen Wasserrad (Fig. 73), welches bei geringer Wassermenge und gröfserem Gefälle zur Anwendung kommt, strömt das Wasser von oben her auf den mit Zellen besetzten Radkranz und dreht das Rad, indem es die nach aufwärts gekehrten Zellen der Vorderseite füllt, vorzugsweise durch sein Gewicht. Die Arbeit,

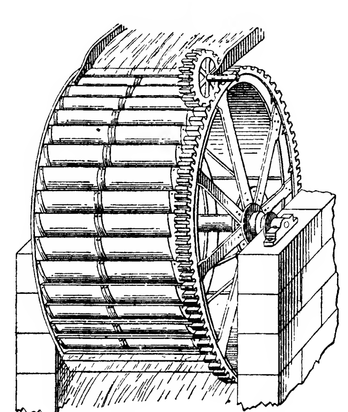


Fig. 73.
**Oberschlächtiges Wasserrad.**

welche ein Gefälle pro Sekunde zu leisten vermag (der Effekt), ist gleich der Arbeit, welche erfordert würde, um das in dieser Zeit herabgeflossene Wassergewicht von dem unteren Wasserstand wieder bis zum oberen zu heben. Sie wird daher, in Meterkilogrammen ausgedrückt, gefunden, wenn man dieses Wassergewicht (in Kilogrammen) mit der (nach Metern gemessenen) Höhe des Gefälles (Stauhöhe) multiplizirt. Diese Arbeitsfähigkeit kann jedoch, abgesehen von den Verlusten durch Reibung, schon darum nicht vollständig nutzbar gemacht werden, weil das Wasser niemals seine ganze durch den Fall erlangte Geschwindigkeit an das Rad abgibt, sondern vom Radkranz noch mit einer Geschwindigkeit abfliefst, welche derjenigen des Radumfangs mindestens gleich ist. Die besten oberschlächtigen Räder liefern etwa 70 Proz. der berechneten Leistung, die unterschlächtigen noch weit weniger.

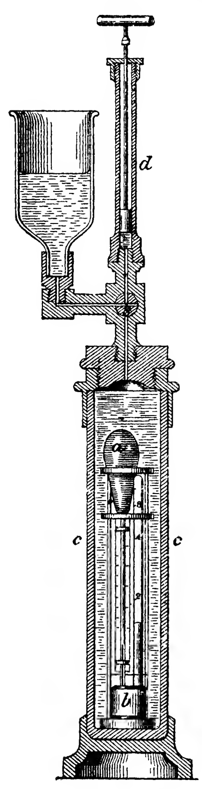


Fig. 74.
Piezometer.

Andere Wassermotoren sind nach dem Prinzip der Dampfmaschine gebaut. Auf die beiden Seiten eines in einem Cylinder sich hin- und herbewegenden Kolbens wirkt abwechselnd Wasser von hohem und geringem Druck. Der kleine nach diesem Prinzip konstruirte Wassermotor von A. Schmidt ist in Städten, wo Hochdruckwasserleitungen zur Verfügung stehen, im Kleingewerbe sehr brauchbar.

71. **Zusammendrückbarkeit** (Kompressibilität) **der Flüssigkeiten.** Die Flüssigkeiten sind durch äufsere Kräfte so wenig zusammendrückbar, dafs man sie lange Zeit für unzusammendrückbar hielt (57). Die Florentiner Akademiker (1661) bearbeiteten eine mit Wasser gefüllte und dann zugelötete Silberkugel mit dem Hammer. Da bei der geringsten Formänderung einer Hohlkugel ihr Rauminhalt kleiner wird, so hätte das Wasser in ihr zusammengedrückt werden müssen. Es ergab sich jedoch, dafs bei jedem Hammerschlag Wasser durch die Silberhülle drang und dieselbe aufsen mit feinen Tröpfchen betaute, woraus geschlossen wurde, dafs das Wasser eher durch eine Metallwand dringe, als sich zusammenpressen lasse. Canton (1761) war der erste, der bewies, dafs auch die Flüssigkeiten zusammendrückbar sind. Da ein Gefäfs einem einseitigen Druck von innen elastisch nachgibt, und sich erweitert, so mufs man, um die Zusammendrückbarkeit der Flüssigkeiten nachzuweisen und zu messen, einen ebenso starken Druck auf die äufsere Gefäfswand wirken lassen, damit der Rauminhalt des Gefäfses ungeändert bleibe. Oersted (1822) bediente sich hierzu des folgenden Verfahrens. Die Flüssigkeit befindet sich in einem birnförmigen Glasgefäfs (*a*, Fig. 74)

mit angeschmolzener enger Glasröhre, dem Piezometer; auf der Röhre wird eine Teilung angebracht und genau festgestellt, wie sich der Rauminhalt eines zwischen zwei Teilstrichen befindlichen Röhrenstücks zum Inhalt des ganzen Gefäfses verhält. Nachdem das Piezometer mit der zu untersuchenden Flüssigkeit, z. B. reinem, ausgekochtem Wasser, gefüllt worden, stellt man es mit dem offenen Ende der Röhre nach unten in ein Gefäfs mit Quecksilber (*b*) und bewirkt durch Erwärmen und Abkühlen, dafs ein wenig Wasser aus der Röhre aus- und dafür etwas Quecksilber in dieselbe eintritt. Neben das Piezometer stellt man noch eine überall gleich weite, mit Luft gefüllte, unten offene und oben zugeschmolzene, mit einer Teilung versehene Glasröhre, die als „Manometer" zur Messung des Druckes dient. Die ganze Vorrichtung stellt man nun in einen starken Glascylinder *cc* (Oersteds Kompressionsapparat), füllt diesen mit Wasser und prefst dann mittels einer auf dem festschliefsenden Deckel angebrachten Druckpumpe noch mehr Wasser, welches beim Hinaufgehen des Pumpenkolbens aus einem daneben befindlichen Wasserbehälter angesaugt wird, hinein. Da der auf das Wasser durch den Kolben ausgeübte Druck sich allseitig mit gleicher Stärke fortpflanzt, so wird das Piezometer durch das umgebende Wasser von aufsen ebenso stark gedrückt, wie durch das Quecksilber hindurch von innen. Man sieht nun, dafs das Quecksilber nicht nur im Manometerrohr, sondern auch in der Piezometerröhre steigt; der Stand des Quecksilbers im Piezometer gibt alsdann nach einer kleinen Korrektur wegen der Zusammendrückung der Glaswand die Raumverminderung des in ihm enthaltenen Wassers, der Stand im Manometer den ausgeübten Druck an; ist nämlich in letzterem die Luft auf $^1/_2$, $^1/_3$, $^1/_4$ u. s. f. ihres anfänglich innegehabten Raums eingeengt worden, so weifs man, dafs sie einem Druck ausgesetzt ist, welcher zwei-, drei-, viermal so grofs ist, als der anfängliche Luftdruck, also 2, 3, 4 etc. „Atmosphären" beträgt, wenn man den gewöhnlichen Luftdruck, welcher 1 kg auf 1 qcm beträgt, als den Druck „einer Atmosphäre" bezeichnet (vgl. 82 und 84). Durch solche Versuche hat man gefunden, dafs bei $0^0$ durch den Druck einer Atmosphäre Quecksilber um 3, Wasser um 50, Weingeist um 84, Äther um 109 Millionteile seines ursprünglichen Rauminhalts zusammengedrückt wird. Hört der Druck auf, so nimmt die Flüssigkeit sofort ihren früheren Raum wieder ein.

72. **Kohäsion der Flüssigkeiten.** Ungeachtet der leichten Verschiebbarkeit der Teilchen einer Flüssigkeit ist zwischen ihnen doch noch molekulare Anziehungskraft, die Kohäsion, thätig. Wenn man in einer oben geschlossenen Glasröhre möglichst luftfreies Wasser über Quecksilber hat, so kann man auf das Quecksilber eine beträchtliche Saugwirkung, also einen negativen Druck, oder einen Zug auf das Wasser ausüben, ohne dafs die Flüssigkeitssäule zerreifst oder von der Wand abreifst (Helmholtz 1882).

Die Molekularkraft, mit welcher zwei Teilchen aufeinander

wirken, nimmt mit ihrer Entfernung sehr rasch ab und wird schon in sehr geringem Abstand unmerklich. Denkt man sich um ein Teilchen mit diesem Abstand als Radius eine Kugel beschrieben, so umschließt diese Kugel, die Wirkungssphäre, alle jene Teilchen, welche auf das im Mittelpunkt gelegene Teilchen noch einwirken. Liegt das Teilchen im Innern der Flüssigkeit, so heben sich die Wirkungen von je zwei in Bezug auf den Mittelpunkt symmetrisch liegenden Teilchen gegenseitig auf, und das betrachtete Teilchen erleidet von den Molekularkräften eine nach allen Seiten gleiche Spannung. Liegt das Teilchen dagegen an der Oberfläche der Flüssigkeit, so ist bloß die eine Hälfte der Wirkungssphäre von wirksamen Teilchen erfüllt, deren Anziehungskräfte sich zu einer Mittelkraft zusammensetzen, die senkrecht zur Oberfläche nach dem Inneren der Flüssigkeit gerichtet ist. Eine solche, wenn auch kleinere, nach innen gerichtete Mittelkraft wirkt auch noch auf jedes Teilchen, welches um weniger als den Halbmesser der Wirkungssphäre von der Oberfläche absteht. Die der Oberfläche nahen Teilchen sind daher bis zu einer Tiefe gleich dem Radius der Wirkungssphäre einem zur Oberfläche senkrechten nach einwärts gerichteten Druck, dem Kohäsionsdruck, unterworfen, und bilden gleichsam ein über die Oberfläche gespanntes dünnes elastisches Häutchen, dessen Beschaffenheit sich von derjenigen der inneren Flüssigkeit unterscheidet.

Da der Kohäsionsdruck aus der Einwirkung der umgebenden Teilchen auf die Teilchen der Grenzschicht entspringt, so fällt er verschieden aus, je nach der räumlichen Anordnung der Teilchen, d. h. je nachdem die Fläche eben oder konkav oder konvex ist. Ist die Oberfläche der Flüssigkeit nach außen hin konkav, so ist der Kohäsionsdruck kleiner, ist sie konvex, so ist er größer als für eine ebene Fläche. Diese Veränderungen des Kohäsionsdruckes sind um so größer, je stärker die Fläche gekrümmt oder je kleiner ihr Krümmungsradius ist.

Unterliegt die Flüssigkeit der Schwere, so nehmen im Ruhezustande ihre Teilchen eine solche Anordnung an, daß die Schwerkraft keines der Teilchen mehr in Bewegung zu setzen vermag. Die freie Oberfläche der Flüssigkeit muß daher überall auf der Richtung der Schwerkraft senkrecht stehen; die freie Oberfläche ist in diesem Falle eine horizontale Ebene. Entzieht man dagegen die Flüssigkeit der Einwirkung der Schwere, bringt man z. B. eine Ölmasse in ein Gemisch von Alkohol und Wasser von gleichem spezifischen Gewicht, wobei sie durch den Auftrieb ihr ganzes Gewicht verliert, so verschieben sich unter dem Einfluß der Molekularkräfte die Teilchen so lange, bis der Kohäsionsdruck in allen Teilen der Oberfläche gleich groß ist. Das ist der Fall, wenn die Krümmung der Oberfläche an allen Stellen gleich, wenn also die Oberfläche eine Kugel ist. Der Kohäsionsdruck bewirkt also, daß die Flüssigkeitsmasse diejenige Form annimmt, bei welcher ihre Oberfläche so klein wie möglich ist. Zwei Tropfen vereinigen sich, sobald sie in Berührung

kommen zu einem einzigen, dessen Oberfläche offenbar kleiner ist, als die der getrennten Tropfen war. Dieses Bestreben der Oberflächenschicht, sich auf eine möglichst kleine Fläche zusammenzuziehen, bezeichnet man als Oberflächenspannung.

73. **Flüssigkeitshäutchen. Blasen.** Taucht man Drahtgerüste, welche die Kanten von Polyëdern (z. B. Tetraëder, Würfel u. s. w.) nachahmen, in Seifenwasser und zieht sie langsam heraus, so bildet die an den Kanten haftende Seifenlösung dünne ebene Häutchen, welche im Innern des Gerüstes sich in scharfen geradlinigen Kanten durchschneiden. Diese zierlichen Figuren entstehen durch das Streben der Molekularkräfte, die kleinste Oberfläche herzustellen; man nennt sie Gleichgewichtsfiguren (Plateau), weil bei ihnen dieses Ziel erreicht ist und die Oberflächenspannungen sich gegenseitig das Gleichgewicht halten.

Eine kugelförmige Blase dagegen ist keine Gleichgewichtsfigur. Hat man eine Seifenblase mit Tabaksrauch gefüllt, so strömt unter dem Druck, welchen die flüssige Hülle auf ihren Inhalt ausübt, die Luft samt dem Rauch aus dem offenen Glasrohr, an welchem die Blase noch hängt, und zwar so heftig, dafs durch den Luftstrom eine Kerzenflamme zur Seite geblasen wird; dabei verkleinert sich die Blase mehr und mehr; sie behält dagegen ihre Gröfse bei, wenn man die Mündung des Röhrchens zuhält, weil alsdann der Überdruck der im Inneren zusammengeprefsten Luft der Oberflächenspannung das Gleichgewicht hält.

Die Entstehung dieses Überdruckes aus dem Kohäsionsdruck in den Oberflächenschichten des Flüssigkeitshäutchens kann man leicht ableiten, wenn man sich vergegenwärtigt, dafs das Flüssigkeitshäutchen einer Seifenblase von zwei Kugelflächen von sehr nahe gleichem Radius begrenzt wird, die in Bezug auf die Flüssigkeit entgegengesetzte Krümmung haben; denn die äufsere Fläche ist eine konvexe, die innere eine konkave Flüssigkeitsoberfläche. Der Überdruck der Luft im Innern ist daher nichts anderes als das Mafs für die Differenz des Kohäsionsdruckes an der konvexen und der konkaven Fläche von gleicher Krümmung und ist, da die Änderung des Kohäsionsdruckes mit der Krümmung proportional geht, der Krümmung der Seifenblase direkt, oder ihrem Radius umgekehrt proportional, $P = 2\,H/R$, wenn $H/R$ die von der Krümmung herrührende Änderung des Kohäsionsdruckes für eine einzelne, kugelförmig gestaltete Fläche bedeutet. Der Konstante $H$ der Oberflächenspannung läfst sich auch eine andere Bedeutung geben durch folgende Überlegung. Verkleinert sich der Radius $R$ der Blase um die kleine Strecke $r$, so ist die hierbei von der Oberflächenspannung geleistete Arbeit $4\pi R^2 Pr$. Sowohl die äufsere als die innere Oberfläche des Häutchens verkleinert sich hierbei um

$$4\pi R^2 - 4\pi(R-r)^2 = 4\pi(R^2 - R^2 + 2Rr - r^2) = 4\pi r(2R - r),$$

wofür man, wenn $r$ gegen $2R$ sehr klein ist, ohne merklichen Fehler $8\pi Rr$ setzen kann. Die Verkleinerung für beide Flächen zusammen beträgt demnach $16\pi Rr$. Bezeichnet man nun mit $a$ die Arbeit der Molekularkräfte bei Verkleinerung der Oberfläche um die Flächeneinheit, so beträgt die von ihnen geleistete Gesamtarbeit $16\pi Rra$, welche der oben berechneten Arbeit der Oberflächenspannung gleich sein mufs. Man hat also

$$4\pi R^2 Pr = 16\pi Rra,$$

woraus für beide Flächen folgt: $P = \frac{4a}{R}$, und für jede einzelne $p = \frac{2a}{R}$. Die Konstante $a$ ist also $= H/2$.

74. **Adhäsion. Randwinkel.** Auch zwischen Flüssigkeiten und festen Körpern wirkt molekulare Anziehung, welche man Adhäsion nennt.

Die Wassertröpfchen, mit welchen sich eine Fensterscheibe betaut, haften an ihr durch Adhäsion; diese ist auch die Ursache, dafs Wasser, welches man aus einem Trinkglas ausgiefsen will, so leicht an der äufseren Wand herabläuft. Wasser, auf eine reine Glasplatte gebracht, zerfliefst auf ihr und benetzt sie; Quecksilber dagegen benetzt die Glasplatte nicht, sondern bildet auf ihr abgerundete Tropfen, und ebenso verhält sich Wasser auf einer mit Fett bestrichenen Oberfläche. Im ersteren Falle ist offenbar die Adhäsion des Wassers zum Glas gröfser als die Kohäsion der Wasserteilchen unter sich, während im zweiten Falle die Kohäsion des Quecksilbers seine Adhäsion zum Glas oder die Kohäsion des Wassers seine Adhäsion zum Fett übertrifft. Man kann daher beim Ausgiefsen von Wasser das Herablaufen an der äufseren Gefäfswand verhüten, wenn man den Rand des Glases mit Fett bestreicht.

Steht eine Flüssigkeit mit einer festen Wand in Berührung, so zeigt die Flüssigkeit an der Berührungsstelle eine eigentümliche Krümmung. Auf ein der Wand anliegendes Flüssigkeitsteilchen *P* (Fig. 75) wirken nämlich aufser der Schwerkraft noch einerseits die Adhäsion mit einer zur Wand senkrechten Kraft *A* nach auswärts, und die Kohäsion mit einer in die Flüssigkeit einwärts gerichteten Kraft *C*. In *P* kann die Flüssigkeit nur im Gleichgewicht sein, wenn sich ihre Oberfläche daselbst senkrecht zu der Mittelkraft *R* aus diesen Kräften in die Richtung *PQ* gestellt hat. Den Winkel *QPW*, welchen die Flüssigkeitsoberfläche mit der Wandfläche bildet, nennt man den Randwinkel; da seine Gröfse nur abhängt von dem Verhältnis der wirkenden Kräfte, so ist er bei gleichbleibender Beschaffenheit von Flüssigkeit und Gefäfswand unveränderlich. Je nachdem die Resultante *R* nach auswärts in die Gefäfswand hinein oder nach einwärts in die Flüssigkeit hinein gerichtet ist, mufs die Flüssigkeit am Rand höher oder tiefer stehen als in der Mitte, wo sie ihre zu Schwerkraft und Kohäsionsdruck senkrechte horizontale Oberfläche beibehält. So steht Wasser in einem Glas an der Wand etwas höher, Quecksilber etwas tiefer als in der Mitte. Man sagt im ersteren Falle, dafs die Flüssigkeit die Gefäfswand benetzt, im zweiten Falle, dafs sie sie nicht benetzt. Vollkommene Benetzung findet statt, wenn sich die Gefäfswand mit einer dünnen Flüssigkeitsschicht überzieht. Der Randwinkel ist dann = 0.

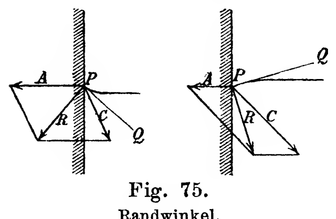


Fig. 75. Randwinkel.

75. **Kapillarität.** Wird eine enge Glasröhre (Kapillar- oder Haarröhrchen) in Wasser getaucht, so steigt das Wasser in derselben in die Höhe und bleibt innerhalb der Röhre höher stehen als aufser-

halb. Ebenso stellt sich in kommunizirenden Röhren, deren eine sehr eng ist, das Wasser in letzterer höher, entgegen den hydrostatischen Gesetzen.

Diese Erhebung (Kapillarattraktion) findet immer statt, wenn das Röhrchen von der Flüssigkeit benetzt wird; taucht man dagegen eine Glasröhre in Quecksilber, von welchem das Glas nicht benetzt wird, so steht das Quecksilber in der Röhre tiefer als aufserhalb (Kapillardepression).

In beiden Fällen ist der Höhenunterschied der Flüssigkeit innerhalb und aufserhalb der Röhre in demselben Verhältnis gröfser, als der Durchmesser der Röhre kleiner ist.

Diese Erscheinungen, welche man unter der Bezeichnung Kapillarität zusammenfafst, erklären sich aus dem Zusammenwirken von Kohäsion und Adhäsion auf folgende Weise.

Da sich die Krümmung der Flüssigkeitsoberfläche in der Nähe der Gefäfswand nur auf eine sehr geringe Entfernung erstreckt, so bleibt in einem weiten Gefäfs die Oberfläche der Flüssigkeit in der Mitte eben und wagrecht; in einer engen Röhre dagegen, in welcher sich die Krümmung bis zur Mitte oder darüber hinaus geltend macht, mufs die Flüssigkeitsoberfläche im Fall der Benetzung die Form einer vertieften (konkaven) Schale annehmen, im Fall der Nichtbenetzung aber eine gewölbte (konvexe) Kuppe bilden. Man nennt eine solche gekrümmte Oberfläche einer Flüssigkeit in enger Röhre „Meniskus“. In einer solchen gekrümmten Oberfläche ist aber, wie wir wissen, der Kohäsionsdruck kleiner oder gröfser als in einer ebenen Fläche, je nachdem die Oberfläche konkav oder konvex gekrümmt ist. In einem benetzten Haarröhrchen, in welchem die konkave Seite der Flüssigkeit nach oben gerichtet ist, besteht daher eine negative Druckdifferenz zwischen der konkaven Fläche innerhalb und der ebenen aufserhalb des Röhrchens, und nach hydrostatischen Prinzipien mufs die Flüssigkeit so weit emporsteigen, bis der Druck der gehobenen Flüssigkeitssäule dieser Differenz der Oberflächenspannung das Gleichgewicht hält. Ebenso begreift man, dafs in der nicht benetzten Röhre die nach unten gerichtete Spannung der gewölbten Kuppe die Flüssigkeitssäule hinabdrängt. Da dieser molekulare Druck mit der Krümmung der Oberfläche wächst, diese Krümmung aber um so stärker ausfällt, je enger die Röhre ist, so sieht man auch ein, dafs der Betrag der Hebung oder Senkung im umgekehrten Verhältnis zum Durchmesser des Röhrchens stehen mufs. Die Steighöhe in vollständig benetzten Röhren ist nicht von dem Material der Röhren, wohl aber von der Natur der Flüssigkeit abhängig; in einer Röhre von 1 mm Durchmesser erreicht Wasser 30 mm, Schwefelsäure 17, Alkohol 12, Äther 9 mm Höhe.

In vollständig benetzter Röhre, wo der Randwinkel Null ist, bildet die Oberfläche eine nach oben konkave Halbkugel vom Radius $R$ der Röhre, welche pro Flächeneinheit einen Zug $2a/R$ nach oben ausübt, und dadurch dem hydrostatischen Druck $hs$, der die gehobene Flüssigkeitssäule von der Höhe $h$ und dem spezifischen Gewichte $s$ nach unten treibt, das Gleichgewicht hält. Man hat daher $hs = 2a/R$, oder $h = 2a/Rs$. Die Gröfse $a$, welche die

Arbeit für die Verkleinerung der Flüssigkeitsoberfläche um die Flächeneinheit ausdrückt, heifst die Kapillaritätskonstante. Sie kann nach Messung von $h$, $R$ und $s$ aus vorstehender Gleichung gefunden werden. — Zwischen zwei parallelen ebenen Platten ist die Erhebung ihrem Abstande $R$ umgekehrt proportional, und zwar ist $hs = a / R$. Stofsen die beiden Platten mit ihren vertikalen Kanten unter einem Winkel zusammen, so dafs ihr Abstand mit der Entfernung von der gemeinschaftlichen Kante proportional zunimmt, so erscheint die gehobene Flüssigkeit oben von einer gleichseitigen Hyperbel begrenzt.

Die Wirkungen der Kapillarität treten uns im täglichen Leben vielfach entgegen. Taucht man ein Stück weifsen Zuckers mit seinem unteren Ende in Kaffee, so steigt die braune Flüssigkeit rasch in ihm empor; die zahlreichen feinen Zwischenräume zwischen den kleinen Krystallen bilden nämlich ein vielverzweigtes Netz von Kapillarröhrchen. Ein auf feuchtem Grund aufgeschütteter Sandhaufen wird aus derselben Ursache bis in eine Spitze hinauf durchfeuchtet. Das Aufsaugen von Flüssigkeiten durch Löschpapier, Schwämme und andere poröse Körper, sowie das Aufsteigen des Öls in den Lampendochten beruht ebenfalls auf Kapillarität.

76. **Auflösung.** Unter „Lösungen“ versteht man allgemein homogene Gemenge zweier Substanzen, d. h. solche Gemenge, bei welchen durch mechanische Mittel keine Trennung der Bestandteile erzielt werden kann. Manche Flüssigkeiten mischen sich in diesem Sinne vollständig, z. B. Wasser und Alkohol, oder Wasser und Schwefelsäure. Auch feste Körper können sich in Flüssigkeiten so verteilen, „sich auflösen“, dafs sie mit der Flüssigkeit ein gleichartiges flüssiges Ganzes bilden. Solche Gemische nennt man Lösungen des betreffenden Körpers in der Flüssigkeit; letztere nennt man das Lösungsmittel. Zucker, Kochsalz, Salpeter z. B. lösen sich in Wasser, Schellack in Weingeist, Gold in Quecksilber und aus der Lösung scheiden sich diese Körper beim Verdampfen des Lösungsmittels unverändert wieder ab. Bei höherer Temperatur vermögen die Flüssigkeiten meist gröfsere Mengen der in ihnen löslichen Körper aufzunehmen als bei niedriger; heifses Wasser z. B. löst mehr Salpeter auf als kaltes, wogegen Kochsalz in kaltem wie in heifsem Wasser etwa gleich gut löslich ist. Eine Lösung, welche von dem aufgelösten Körper so viel enthält, als sie bei der stattfindenden Temperatur aufzunehmen im stande ist, heifst gesättigt. Aus einer heifsgesättigten Salpeterlösung mufs sich daher beim Erkalten ein Teil des gelösten Salzes in festem Zustand abscheiden, wobei die Flüssigkeit für den niedrigeren Wärmegrad, auf welchen sie abgekühlt wird, gesättigt bleibt.

Der Vorgang der Auflösung eines festen Körpers in einer Flüssigkeit hat grofse Ähnlichkeit mit dem weiter unten zu behandelnden Vorgange der Verdampfung. Auch für jeden als Dampf einen Raum erfüllenden Stoff besteht ein von der Temperatur abhängiger Sättigungspunkt, ein Maximum der erreichbaren Dichte.

Es kann jedoch auch vorkommen, dafs trotz Abkühlung unter den Sättigungspunkt keine Abscheidung des festen Körpers eintritt;

die Lösung ist alsdann übersättigt, und die Abscheidung erfolgt erst dann und zwar plötzlich, wenn durch Erschütterung, durch Hineinwerfen eines Krystalls der gelösten Substanz u. dgl. der Anstofs dazu gegeben wird. Eine bestimmte Löslichkeit besitzen nur krystallisationsfähige Körper (Krystalloide), wie z. B. die oben genannten Salze. Nicht krystallisirbare Körper, wie Leim, Gummi, Eiweifs u. dgl. (Kolloide) sind in jeder beliebigen Menge des Lösungsmittels löslich, oder quellen wenigstens mit geringen Mengen der Flüssigkeit gallertartig auf.

Bei der Auflösung fester Körper in Flüssigkeiten und der Mischung zweier Flüssigkeiten findet in der Regel eine Änderung des Volumens statt; z. B. Alkohol und Wasser miteinander gemischt, ziehen sich auf ein kleineres Volumen zusammen (Kontraktion) und erwärmen sich dabei.

77. **Diffusion.** Schichtet man zwei mischbare Flüssigkeiten vorsichtig so übereinander, dafs die leichtere auf der schwereren schwimmt, z. B. Alkohol über Wasser, so findet auch in diesem Falle, ohne dafs äufsere Kräfte (z. B. Rühren) oder die Schwerkraft die Flüssigkeiten in Bewegung setzen, eine allmählich fortschreitende, schliefslich vollständige Mischung der beiden Flüssigkeiten statt. Diesen Vorgang der Mischung zweier Flüssigkeiten durch fortschreitenden Austausch von Schicht zu Schicht nennt man Diffusion. Nicht mischbare Flüssigkeiten diffundiren nicht, sondern lagern sich nach der Ordnung ihrer spezifischen Gewichte dauernd übereinander, wie z. B. Öl und Wasser.

78. **Osmose.** Der gegenseitige Austausch zweier miteinander mischbarer Flüssigkeiten kann auch durch eine feinporöse Scheidewand hindurch stattfinden. Man nennt diesen Vorgang Osmose (Endosmose, Exosmose; Dutrochet, 1826). In dem Hals eines Fläschchens, dessen Boden abgesprengt ist, werde mittels eines durchbohrten Korkes eine Glasröhre befestigt und der fehlende Boden durch eine darübergebundene Schweinsblase ersetzt. Dieses mit einer Flüssigkeit, z. B. Weingeist, gefüllte Gefäfs werde in ein weiteres, Wasser enthaltendes Gefäfs eingesenkt. Man wird nun bemerken, dafs der Weingeist in der Röhre allmählich bis zu einer Höhe von 40 bis 50 cm steigt. Es ist demnach Wasser durch die Blase zu dem Weingeist in das Gefäfs der Schwerkraft entgegen hineingedrungen (Endosmose); andererseits aber ist auch Weingeist aus dem Gefäfs zu dem Wasser herausgetreten (Exosmose), wie man leicht an der Färbung des Wassers bemerkt, wenn der angewendete Weingeist gefärbt war. Das Steigen der Flüssigkeit in der Röhre beweist, dafs mehr Wasser zu dem Weingeist durch die Blase hinein- als Weingeist zu dem Wasser heraustrat. Ersetzt man aber die Schweinsblase durch eine Kautschukplatte, so findet man, dafs mehr Weingeist zum Wasser wandert als umgekehrt. Es kommt also bei diesem Austausch wesentlich auf die Beschaffenheit der Scheidewand an.

Ein exaktes Mafs für die bei derartigen Vorgängen wirkenden Kräfte erhält man in denjenigen Fällen, in denen es möglich ist, eine Scheidewand anzuwenden, welche nur den einen der beiden diffundirenden Stoffe durchläfst. Man stellt solche „halbdurchlässigen" Wände dadurch her, dafs man eine poröse Thonzelle zunächst mit einer Lösung von Kupfersulfat tränkt, dann sorgfältig ausspült und sie darauf mit einer Lösung von Ferrocyankalium anfüllt. Es bildet sich alsdann auf und in der Thonwand der Zelle eine zusammenhängende Decke von Ferrocyankupfer, welche wohl für Wasser, aber z. B. nicht für die Zuckerteilchen einer Zuckerlösung durchlässig ist. Füllt man nun eine so vorbereitete Zelle mit einer Zuckerlösung, verschliefst sie mit einem Stopfen, der ein Steigrohr enthält, und taucht sie in reines Wasser, so vollzieht sich der Diffusionsvorgang in diesem Falle ausschliefslich in einer Richtung, indem nämlich Wasser in die Zelle eintritt und die Lösung in dem Steigrohr allmählich bis zu einer bestimmten, von ihrer Konzentration abhängigen Höhe ansteigt. Ist diese erreicht, so besteht Gleichgewicht; es tritt kein Wasser mehr in die Zelle ein, noch aus ihr aus. Man kann denselben Gleichgewichtszustand auch dadurch erreichen, dafs man von vornherein durch einen auf die freie Oberfläche der Lösung ausgeübten Druck das Aufsteigen der Flüssigkeit verhindert; dazu ist dann ein ganz bestimmter, der Koncentration der Lösung proportionaler Druck erforderlich. Diesem Druck, bezw. dem Gewicht der gehobenen Flüssigkeitssäule wird offenbar das Gleichgewicht gehalten durch einen in der Lösung von den aufgelösten Zuckerteilchen ausgeübten Gegendruck. Man nennt diesen Druck, mit dem die Zuckerteilchen die freie Oberfläche der Lösung emportreiben und das Wasser zum Nachströmen durch die halbdurchlässige Membran veranlassen, den osmotischen Druck des Zuckers in der Lösung. Er wird gemessen durch den hydrostatischen Druck, der ihm das Gleichgewicht hält (Pfeffer, 1877). In einer einprozentigen Zuckerlösung ist der osmotische Druck bei $0^{0}$ gleich dem Druck einer Quecksilbersäule von 49,3 cm Höhe; in einer einprozentigen Salpeterlösung beträgt er sogar mehr als 228 cm Quecksilberhöhe (3 Atmosphären). Ist die Lösung in einer gewöhnlichen Thonzelle eingeschlossen, so sucht der osmotische Druck nicht blofs das Volumen der Lösung dadurch zu vergröfsern, dafs er die Flüssigkeitskuppe in die Höhe drückt und dadurch das Wasser in die Zelle hineinzieht, sondern er treibt auch die Moleküle des gelösten Stoffes durch die Wand in das Lösungsmittel hinein.

In derselben Weise wirkt der osmotische Druck als treibende Kraft bei dem Vorgange der gewöhnlichen Diffusion (s. o.), wenn wir z. B. reines Wasser über eine koncentrirte Zucker- oder Salzlösung schichten. In allen diesen Fällen können wir den osmotischen Druck als Äufserung der Expansivkraft des gelösten Stoffes, seines Bestrebens, ein möglichst grofses Volumen des Lösungsmittels auszufüllen, ansehen und können ihn in engste Parallele zu der Expansivkraft und dem Druck der Gase stellen, die wir im nächsten Kapitel behandeln.

Im alltäglichen Leben begegnen uns mancherlei Beispiele osmotischer Wirkung. Bohnen und Erbsen, welche man in Wasser „einweicht", quellen auf, weil mehr Wasser durch die Zellhäute in die Zellen hineindringt, als von dem Zellinhalt heraustritt. Bestreut man einen in Scheiben geschnittenen Rettig mit Kochsalz, so „zieht er Wasser"; die wässerige in den Zellen enthaltene Flüssigkeit tritt nämlich in gröfserer Menge zu der koncentrirten Salzlösung heraus, welche sich bei Berührung des Salzes mit den feuchten Schnittflächen gebildet hat. Die Osmose spielt im Leben der Pflanzen und Tiere eine überaus wichtige Rolle, denn der Austausch der Säfte zwischen den rings geschlossenen Zellen und Blutgefäfsen kann nur osmotisch durch deren Wandungen hindurch erfolgen. Graham hat gezeigt, dafs Körper, welche im festen Zustand krystallinisch sind, und die er deshalb Krystalloidsubstanzen nennt, wie z. B. Zucker, Salze etc., viel leichter durch eine poröse Scheidewand hindurchgehen als gewisse nicht krystallisirbare Körper, wie Leim, Eiweifs, Gummi, Caramel, lösliche Kieselsäure u. a., welche mit Wasser gallertartige Massen bilden und von Graham Kolloidsubstanzen genannt werden. Man kann sich dieses Verhaltens bedienen, um Körper von beiden Arten, welche miteinander gemischt sind, durch Osmose voneinander zu trennen. Man nennt dieses Verfahren Dialyse und führt dasselbe aus mittels des Dialysators, eines flachen Gefäfses aus Hartkautschuk, dessen Boden aus Pergamentpapier besteht; diese Vorrichtung läfst man in einem eine beträchtliche Menge Wassers enthaltenden Gefäfs schwimmen. Giefst man nun in den Dialysator z. B. eine aus Gummi und Zucker gemischte Lösung, so wird der Zucker nach einiger Zeit fast vollständig durch das Pergamentpapier in das Wasser übergegangen sein, während im Dialysator eine fast reine Gummilösung zurückbleibt.

---

# IV. Gase.

## (Aërostatik.)

---

79. **Expansivkraft.** Die luftförmigen Körper oder Gase haben mit den flüssigen die leichte Verschiebbarkeit und große Beweglichkeit der Teilchen gemein, sie unterscheiden sich aber sehr wesentlich von ihnen durch die leichte Zusammendrückbarkeit, welche gestattet, eine eingeschlossene Luftmenge durch einen Druck von außen auf die Hälfte, ein Drittel, ein Zehntel etc. ihres ursprünglichen Rauminhaltes einzuengen, und andererseits durch das Bestreben, sich auszudehnen und jeden auch noch so großen ihnen dargebotenen Raum auszufüllen. Die Gase müssen daher, um nicht zu entweichen, in rings geschlossene Gefäße eingesperrt werden. Vermöge dieses Ausdehnungsbestrebens, welches man auch Expansivkraft, Spannkraft oder Tension nennt, übt das eingeschlossene Gas auf die Gefäßwände einen Druck aus, welcher überall senkrecht gegen die Gefäßwand gerichtet und dem Flächeninhalt des gedrückten Flächenstückchens proportional ist; auch im Innern der Gasmasse wirkt dieser Druck nach allen Seiten mit gleicher Stärke, so daß ein in das Gas hineingebrachtes ebenes Flächenstückchen, welche Lage man demselben auch geben mag, von beiden Seiten her den gleichen zu seiner Oberfläche senkrechten Druck erfährt. Man kann die Expansivkraft der Luft leicht nachweisen mittels einer fest zugebundenen Blase, welche nur wenig Luft enthält und daher schlaff und runzelig erscheint. Die Expansivkraft der eingeschlossenen Luft kann sich zunächst nicht äußern, weil die umgebende Luft mit gleicher Kraft von außen her auf die Blase drückt. Bringt man aber die Blase unter eine Glasglocke, aus welcher man die Luft mittels einer Luftpumpe entfernt, so wird die Blase durch das Ausdehnungsbestreben der in ihr enthaltenen Luft aufgebläht, bis sie straff gespannt ist. Läßt man dann die äußere Luft wieder in die Glasglocke eintreten, so schrumpft die Blase auf ihren ursprünglichen Rauminhalt zusammen.

80. **Gewicht der Luft. Luftdruck.** Vermöge der Expansivkraft würde sich die Luft, welche den Erdball als Lufthülle oder Atmosphäre rings umgibt, in den Weltenraum zerstreuen, wenn sie nicht durch die Anziehungskraft der Erde oder durch die Schwerkraft daran gehindert würde. Um zu zeigen, daß die Luft schwer ist, macht man einen Glasballon, dessen Hals mit einem luftdicht schließenden Hahn versehen ist, mittels der Luftpumpe möglichst luftleer, hängt

ihn an den einen Arm einer Wage und bringt ihn durch Auflegen von Gewicht auf der anderen Seite ins Gleichgewicht. Läfst man nun, indem man den Hahn öffnet, die Luft wieder einströmen, so neigt sich die Wage nach der Seite des Ballons, und man mufs, wenn der Ballon 1 Liter Inhalt hat, etwas mehr als 1 g auf die andere Wagschale legen, um das Gleichgewicht wieder herzustellen; die Luft ist hiernach nicht ganz 1000 mal (genau 773 mal) leichter als Wasser. Der Boden eines mit Luft oder einem anderen Gas gefüllten Gefäfses wird sonach aufser dem Druck, welcher von dem Ausdehnungsbestreben herrührt, noch einen durch die Schwerkraft verursachten Druck auszuhalten haben, welcher gleich dem Gewicht der lotrecht darüberstehenden Gassäule ist, und wenn man in einem Gas von einem tiefer gelegenen Punkte zu einem höher gelegenen sich erhebt, so wird wie in einer Flüssigkeit der Druck abnehmen und zwar um das Gewicht der Gassäule, welche man unter sich zurückgelassen hat. Die vom Gewicht der Gase bedingten Druckunterschiede mit der Höhe sind freilich im Vergleich zu dem von der Expansivkraft herrührenden Drucke so gering, dafs sie bei kleinen Gasmengen gar nicht in Betracht kommen; bei sehr hohen Gefäfsen aber und namentlich in unserer Atmosphäre spielen sie eine wichtige Rolle. Da die Luft zusammendrückbar ist, so wird jede Schicht der Atmosphäre durch das Gewicht der darüberliegenden Schichten zusammengeprefst und verdichtet; die Dichte der atmosphärischen Luft nimmt daher wie ihr Druck von unten nach oben fortwährend ab. An der Erdoberfläche selbst, auf dem Grunde des Luftmeeres, welches den Erdball rings umflutet, ist dieser Druck ein sehr beträchtlicher.

81. **Barometer.** Um die Gröfse des Luftdrucks zu bestimmen, fülle man eine etwa 80—90 cm lange, an einem Ende zugeschmolzene gerade Glasröhre ganz mit Quecksilber, welches man in kleinen Portionen eingiefst und portionsweise auskocht, um die an der Glaswand haftende Luft auszutreiben, bringe das offene, mit dem Finger zugehaltene Ende unter Quecksilber, welches sich in einer Schale befindet, entferne den verschliefsenden Finger und stelle die Röhre lotrecht (Fig. 76, *A*). Das Quecksilber fliefst dann nur teilweise aus, und eine Quecksilbersäule, deren Gipfel 76 cm hoch über dem Spiegel des Quecksilbers im Gefäfs liegt, bleibt in der Röhre stehen. Der Raum über dem Quecksilber in der Röhre ist, wenn dieselbe durch Sieden des Quecksilbers von anhaftender Luft befreit war, vollkommen luftleer; denn neigt man die Röhre, so bleibt der Gipfel der Quecksilbersäule stets in der gleichen Höhe über dem Quecksilber des Gefäfses, das Quecksilber füllt jenen Raum immer mehr aus (Fig. 76, *B*), und füllt ihn endlich ganz aus, ohne dafs das kleinste Luftbläschen zurückbleibt, wenn man die Röhre so weit geneigt hat, dafs ihr zugeschmolzenes Ende sich weniger als 76 cm über dem Quecksilberniveau des Gefäfses befindet (Fig. 76, *C*). Nach Torricelli, welcher 1644 diesen Versuch zuerst angestellt hat, nennt man den leeren Raum im obersten Teil der Röhre die Torri-

cellische Leere. Warum fliefst aber die Quecksilbersäule nicht aus, obgleich ihr unteres Ende mit dem Quecksilber des Gefäfses in freier Verbindung steht? Offenbar deswegen nicht, weil sie von dem auf die Oberfläche des Quecksilbers wirkenden Luftdruck, der sich durch diese Flüssigkeit nach allen Richtungen fortpflanzt und an der unteren Mündung der Röhre nach oben wirkt, getragen wird. Es ergibt sich also, dafs eine Quecksilbersäule von 76 cm oder 760 mm Höhe dem Luftdruck das Gleichgewicht hält und sonach als Mafs für denselben dienen kann. Es läfst sich nun auch leicht angeben, wie grofs der Luftdruck, in Gewichtseinheiten ausgedrückt, für jede Flächeneinheit ist. Wenn nämlich der Querschnitt der Röhre 1 qcm beträgt, so enthält die 76 cm hohe Quecksilbersäule 76 ccm; sie hat also, da jedes Kubikcentimeter Quecksilber 13,6 g wiegt, ein Gewicht von $76 \times 13,6 = 1033$ g oder etwas mehr als 1 kg; mit diesem Gewicht ist die Quecksilbersäule bestrebt, herabzusinken; der Luftdruck mufs ihr, um sie in der Röhre schwebend zu erhalten, mit der gleichen Kraft entgegendrücken. Die Luft übt demnach auf jedes Quadratcentimeter Fläche einen Druck von 1 kg aus, oder eine Luftsäule von 1 qcm Grundfläche, welche von der Erdoberfläche bis zum Ende der Atmosphäre lotrecht emporreicht, wiegt 1 kg, d. i. soviel wie eine 10 m hohe Wassersäule. Ein Blatt Briefpapier, welches 20 cm lang und 15 cm breit ist, folglich 300 qcm Flächeninhalt besitzt, hat demnach von seiten der Luft einen Druck von 300 kg auszuhalten; da aber dieser Druck gerade so stark auf die untere Seite des Blattes nach aufwärts wie auf die obere Seite nach abwärts wirkt, so können wir dasselbe ebenso ungehindert hin und her bewegen, als wenn gar kein Druck der Atmosphäre auf ihm lastete. Der menschliche Körper ist, wenn wir seine Oberfläche gleich einem Quadratmeter annehmen, dem ungeheuren Luftdruck von 10000 kg ausgesetzt; wir empfinden aber diesen Druck nicht, weil er von allen Seiten, von oben und von unten, von vorn und von hinten, von aufsen und von innen auf gleiche Flächenteile mit gleicher Stärke wirkt. Dagegen tritt die Gewalt des Luftdrucks sofort in die Erscheinung, wenn man ihn nur einseitig wirken läfst. Setzt man z. B. einen Bleiring, über welchen eine straff gespannte Schweinsblase gebunden ist, mit seinem eben abgeschliffenen Rand auf den Teller der Luftpumpe und pumpt die Luft unter der Blase fort, so wird diese durch den nur noch von oben her wirkenden Luftdruck nach einwärts gedrückt und zerplatzt nach wenigen Pumpenzügen mit heftigem Knall. Quecksilber, in ein Holznäpfchen gegossen, das auf eine Glasglocke gekittet ist, wird durch den Luftdruck in feinen Tröpfchen durch die Poren des

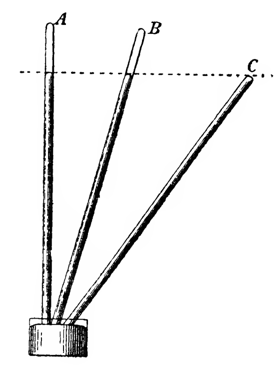
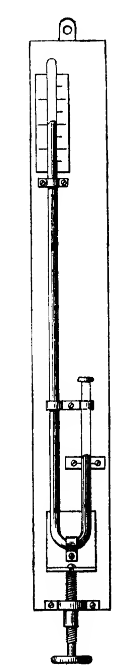


Fig. 76.
Torricellis Versuch.

Holzes geprefst, wenn man die Luft aus der Glocke entfernt (Quecksilberregen). Berühmt geworden ist der Versuch, welchen der Erfinder der Luftpumpe, Otto v. Guericke, Bürgermeister in Magdeburg, 1654 im Beisein des Kaisers Ferdinand III. auf dem Reichstage von Regensburg zum Nachweis des Luftdrucks anstellte. Zwei hohle metallene Halbkugeln von $^2/_3$ Ellen innerer Weite, welche luftdicht aneinander pafsten (die Magdeburger Halbkugeln), wurden möglichst luftleer gepumpt. Sie hielten alsdann infolge des Luftdrucks so fest zusammen, dafs 16 kräftige Pferde kaum im stande waren, sie auseinander zu reifsen.

Man pflegt jedoch den Druck der Luft (oder luftförmiger Körper überhaupt) gewöhnlich nicht in Kilogrammen, sondern bequemer blofs durch die Höhe der Quecksilbersäule anzugeben, welche diesem Druck das Gleichgewicht hält. Man bringt daher neben der Röhre einen lotrechten, in Millimeter geteilten verschiebbaren Mafsstab an, dessen in einer Spitze liegender Nullpunkt auf dem Spiegel des Quecksilbers im Gefäfs eingestellt wird; die Teilung braucht blofs oben in der Nähe des Gipfels der Quecksilbersäule wirklich ausgeführt zu sein. Eine solche Vorrichtung nennt man ein Barometer (Luftdruckmesser) und zwar, weil sich die untere Quecksilberfläche in einem weiteren Gefäfs befindet, ein Gefäfsbarometer. Wenn das Quecksilber in der Barometerröhre sinkt, so mufs es, weil ja Quecksilber aus der Röhre austritt, in dem Gefäfs steigen, und hier wieder sinken, wenn es dort steigt. Diese Schwankungen der Quecksilberoberfläche sind um so unbedeutender, je breiter das Gefäfs ist im Vergleich zu dem Durchmesser der Röhre, und können, wenn das Gefäfs sehr weit ist, aufser acht gelassen werden. Bei den gewöhnlichen in jedem Haus eingebürgerten Barometer bestehen Röhre und Gefäfs nur aus einem Stück, indem an die unten umgebogene Glasröhre ein birnförmiges Gefäfs angeschmolzen ist (Phiolenbarometer); da der Durchmesser desselben nicht hinlänglich grofs ist, so erreichen die Schwankungen des Quecksilberspiegels im Gefäfs eine merkliche Gröfse, so dafs an der feststehenden Skala eine genaue Messung des Barometerstandes, wozu diese Instrumente übrigens auch nicht bestimmt sind, nicht möglich ist. Beim Heberbarometer (Fig. 77) sind beide Schenkel der unten heberartig umgebogenen Glasröhre gleichweit, so dafs die untere Quecksilberkuppe um ebensoviel steigt, als die obere sinkt, und umgekehrt. Um den Barometerstand zu finden, stellt man durch Verschiebung der Röhre mittels einer Schraube die untere Kuppe auf den Nullpunkt der Skala ein, oder man liest bei feststehender Skala den Stand beider Kuppen ab.


Fig. 77. Heberbarometer.

Das Quecksilberbarometer bietet einerseits wegen seiner Füllung

mit der schweren Flüssigkeit, andererseits wegen seiner beträchtlichen Länge manche Unbequemlichkeiten dar, namentlich wenn das Instrument auf Reisen mitgenommen werden soll. Bei den Metallbarometern, in welchen dem Luftdruck durch die Elasticität eines festen Körpers das Gleichgewicht gehalten wird, fallen diese Übelstände weg. Bei dem Aneroid- oder Holosterikbarometer von Vidi (Feder- oder Dosenbarometer) wirkt der Luftdruck auf die aus dünnem Metallblech verfertigte, wellig gebogene vordere Wand einer luftleeren Metalldose und biegt dieselbe nach Maſsgabe seiner Stärke mehr oder weniger stark nach innen. Die Gröſse dieser Eindrückung überträgt sich durch eine Fühlhebelvorrichtung auf einen Zeiger, der auf einem durch Vergleichung mit einem Quecksilberbarometer eingeteilten Zifferblatt die Stärke des Luftdrucks angibt.

Der oben angegebene Barometerstand von 760 mm (der Normalbarometerstand) entspricht einem Luftdruck, wie er ungefähr an der Oberfläche des Meeres herrscht. An höher gelegenen Orten, wo der Luftdruck geringer ist, steht das Barometer entsprechend niedriger; in Potosi z. B., 4300 m ü. M., beträgt der Barometerstand nur noch 471 mm. Vom Meeresspiegel aus muſs man um 10,5 m steigen, wenn die Quecksilbersäule um 1 mm sinken soll; in gröſseren Höhen, wo die Dichte der Luft geringer ist, bedarf es, um eine gleichgroſse Verminderung des Barometerstandes zu bewirken, einer gröſseren Erhebung; von Potosi aus z. B. muſs man 16,8 m emporsteigen, damit das Barometer um 1 mm falle. Da das Gesetz, nach welchem der Luftdruck nach oben hin abnimmt, bekannt ist (s. u.), so kann man aus dem Barometerstand eines Ortes die Höhe desselben über dem Spiegel des Meeres berechnen. Dabei wäre freilich vorausgesetzt, daſs an jedem Orte ein bestimmter Barometerstand beständig herrsche. Dem ist aber nicht so. Es ändert sich vielmehr der Luftdruck an ein und demselben Orte unaufhörlich. Wenn man daher von dem Barometerstand eines Ortes spricht und daraus etwa dessen Höhe über der Meeresoberfläche bestimmen will, so ist damit der mittlere Barometerstand des Ortes gemeint, wie er sich als Mittelwert aus zahlreichen länger fortgesetzten Beobachtungen ergibt.

Die ebenerwähnten ziemlich beträchtlichen Schwankungen des Barometers rühren von Störungen im Gleichgewicht der Atmosphäre her, welche den Änderungen des Wetters vorausgehen oder sie begleiten. Diesem Zusammenhang zwischen Witterung und Luftdruck verdankt das Barometer seinen Ruf als Wetterprophet und seine Einbürgerung unter die Hausgeräte. Es wird, um diesem Zweck zu dienen, mit einer Witterungsskala versehen, die von unten nach oben gewöhnlich folgende Bezeichnung trägt: „Sturm, Viel Regen, Regen oder Wind, Veränderlich, Schön Wetter, Beständig schön, Sehr trocken.“ Diese Skala muſs mit der Bezeichnung „Veränderlich“ auf den mittleren Barometerstand des Ortes, für welchen das Barometer bestimmt ist, eingestellt sein.

Da sich der Luftdruck nach allen Seiten mit der gleichen Stärke

fortpflanzt, so herrscht in unseren Zimmern, welche ja niemals, auch wenn man Fenster und Thüren schliefst, luftdicht abgesperrt sind, immer der nämliche Luftdruck wie draufsen. Man braucht daher das Barometer nicht etwa im Freien aufzuhängen, sondern man wird es im Zimmer an geschützter Stelle unterbringen. Wo man aber auch das Barometer beobachten mag, mufs man darauf Rücksicht nehmen, dafs das Quecksilber durch die Wärme ausgedehnt und dadurch spezifisch leichter wird; die Folge davon ist, dafs bei gleichem Luftdruck, aber ungleicher Temperatur die Höhen der Quecksilbersäule verschieden ausfallen. Man ist daher übereingekommen, als Mafs des Luftdrucks stets die Höhe einer Quecksilbersäule von $0^0$ anzugeben. Da man die Ausdehnung des Quecksilbers kennt (sie beträgt $^1/_{5550}$ für $1^0$ C.), so läfst sich die kleine Verbesserung, welche man an dem beobachteten Barometerstand, um ihn „auf $0^0$ zu reduziren“, anbringen mufs, leicht ermitteln, wenn man nur gleichzeitig mit dem Barometerstand auch die Temperatur des Barometers an einem zu diesem Zweck beigefügten Thermometer abliest. Auch die Ausdehnung der Skala mufs berücksichtigt werden. Die Quecksilbersäule wird ferner durch die Oberflächenspannung ihrer gewölbten Kuppe etwas herabgedrückt; diese Kapillardepression, die um so geringer ausfällt, je weiter die Röhre ist, mufs (bei Gefäfsbarometern) dem abgelesenen Barometerstand hinzugezählt werden.

82. **Mariottesches (Boylesches) Gesetz.** Jedem ist aus seiner Kinderzeit die Knallbüchse und ihre Wirkung bekannt: die Enden eines Rohres werden mit gut schliefsenden Korken verschlossen, zwischen welchen nun eine Luftmenge, welche dieselbe Dichte besitzt, und denselben Druck ausübt, wie die äufsere Luft, abgegrenzt ist. Wird jetzt der eine Kork mittels eines Stempels hineingedrückt, so wächst der Druck der eingesperrten Luft in dem Mafse, in welchem sie zusammengeprefst wird, bis der andere Kork diesem Druck nicht mehr zu widerstehen vermag und mit einem Knall herausgeschleudert wird. Es hat ferner jeder schon beobachtet, dafs man, wenn man eine gut schliefsende Federbüchse öffnen will, einen Widerstand empfindet, der um so gröfser wird, je weiter man den Deckel herauszieht, bis endlich nach einiger Anstrengung unter einem Knall das Öffnen gelingt. Die in der Federbüchse eingeschlossene Luft besitzt nämlich anfangs den gleichen Druck und die gleiche Dichte wie die äufsere atmosphärische Luft: beim Herausziehen des Deckels aber nimmt sie den gröfseren Raum ein, welcher ihr nun dargeboten wird, und in demselben Mafse wird ihr Druck geringer als der äufsere Druck, so dafs sich dieser mit seinem Übergewicht dem Herausziehen des Deckels widersetzt. Boyle (1662) und Mariotte (1679) haben zuerst den gesetzmäfsigen Zusammenhang zwischen dem Druck und dem Volumen einer gegebenen Gasmenge aufgefunden. Zwei Glasröhren (Fig. 78), deren eine oben durch einen Glashahn verschliefsbar, die andere beiderseits offen ist, sind unten durch einen Kautschukschlauch verbunden, der ebenso wie ein Teil der Röhren mit Quecksilber ge-

füllt ist. Beide Röhren sind mittels Schlitten längs einer vertikalen in Centimeter und Millimeter geteilten Säule verschiebbar und in jeder Höhe feststellbar. Bei offenem Hahn steht das Quecksilber in beiden Röhren gleich hoch, und behält diesen Stand auch noch, wenn man den Hahn schliefst; die in der geschlossenen Röhre abgesperrte Luft übt also denselben Druck aus wie die in die offene Röhre hineinwirkende äufsere Luft. Schiebt man nun letztere Röhre hinauf, so steigt das Quecksilber in beiden Röhren, in der geschlossenen jedoch viel langsamer, indem es die daselbst eingesperrte Luftmenge zusammendrückt. Wenn diese Luftmenge gerade auf die Hälfte ihres anfänglichen Rauminhalts zusammengeprefst ist, so findet man, dafs die Quecksilbersäule in der offenen Röhre, vom Quecksilberniveau im kürzeren Schenkel aus gerechnet, gerade so hoch ist wie die Quecksilbersäule in einem gleichzeitig beobachteten Barometer. Der Druck der abgesperrten Luft hält also jetzt aufser dem Druck der Atmosphäre, welcher nach wie vor in das offene Rohr herein wirkt, auch noch dem Druck dieser Quecksilbersäule, welcher dem Druck der Atmosphäre gleich ist, das Gleichgewicht; die auf die Hälfte ihres ursprünglichen Raumes eingeengte Luft übt also einen doppelt so grofsen Druck aus wie vorher, nämlich einen Druck, der doppelt so grofs ist als der Druck der Atmosphäre oder welcher, wie man sich auszudrücken pflegt, zwei Atmosphären beträgt. Wird die Luft im geschlossenen Schenkel durch weiteres Heben der offenen Röhre auf ein Drittel ihres anfänglichen Raums zusammengedrängt, so trägt sie aufser dem äufseren Luftdruck eine Quecksilbersäule von doppelter Barometerhöhe, also im ganzen einen Druck von 3 Atmosphären u. s. f. Wird ferner das offene Rohr, von gleichem Quecksilberstand oder von Atmosphärendruck ausgehend, gesenkt, so dehnt sich die eingesperrte Luft aus, und im geschlossenen Rohr stellt sich das Quecksilber um $^1/_2$, $^2/_3$ Barometersäule höher als im offenen, sobald die Luft das doppelte, dreifache Volumen erreicht hat, ihr Druck kann also nur im Verein mit einer Quecksilbersäule von $^1/_2$, $^2/_3$ Atmosphäre dem ganzen in das offene Rohr hineinwirkenden Atmosphärendruck das Gleichgewicht halten, und beträgt sonach bei doppeltem, dreifachem Volumen nur noch die Hälfte, ein Drittel u. s. w. des anfänglichen Drucks. Es ergiebt sich also das Gesetz von Boyle und Mariotte, gewöhnlich das Mariottesche Gesetz genannt: Der Druck, den eine gegebene Gasmenge ausübt, steht im umgekehrten Verhältnis zu ihrem Rauminhalt oder im geraden Verhältnis zu

Fig. 78.
Mariottesches Gesetz.

ihrem spezifischen Gewicht (zu ihrer Dichte), vorausgesetzt, dafs die Temperatur ungeändert bleibt.

Bezeichnet man mit $p_0$ und $v_0$ Druck und Volumen einer und derselben Gasmasse im Anfangs-, mit $p$ und $v$ in irgend einem anderen Zustande, so ist hiernach $p : p_0 = v_0 : v$, oder $pv = p_0 v_0$. Da $p_0 v_0$ für eine gegebene Gasmenge eine gegebene unveränderliche Gröfse ist, so kann man das Mariottesche Gesetz auch wie folgt aussprechen: Bei gleichbleibender Temperatur ist das Produkt aus Druck und Volumen einer und derselben Gasmenge unveränderlich.

Arago und Dulong haben mittels einer Röhre, welche an einem Mastbaum befestigt, sich in einem Turm des Collège Henri IV zu Paris erhob, das Mariottesche Gesetz für atmosphärische Luft bis zu einem Druck von 27 Atmosphären geprüft und richtig gefunden. Spätere Versuche von Regnault (1847) haben aber gezeigt, dafs das Mariottesche Gesetz, wenn auch sehr nahe, doch nicht ganz genau giltig ist, dafs nämlich bei wachsendem Druck Wasserstoffgas etwas weniger, die übrigen Gase etwas stärker zusammengedrückt werden, als das Mariottesche Gesetz verlangt.

83. **Barometerformel.** Aus dem Mariotteschen Gesetz ergibt sich nun auch das Gesetz, nach welchem der Luftdruck bei der Erhebung in der Atmosphäre abnimmt. Ist $b$ in Millimeter ausgedrückt der Barometerstand in irgend einer Höhe, und steigt man von hier um 1 m empor, so sinkt die Quecksilbersäule um ein kleines Stückchen, das soviel wiegt, wie die durchmessene Luftsäule von gleichem Querschnitt. Da nun Wasser 773 mal so schwer ist als Luft von $0^0$ und 760 mm Druck, und Quecksilber 13,6 mal so schwer als Wasser, und da sich die Dichten der Luft nach dem Mariotteschen Gesetz verhalten wie die Drucke $b$ und 760, so beträgt die Höhe der kleinen Quecksilbersäule, welche mit der Luftsäule von 1 m oder 1000 mm Höhe gleich schwer ist, nur $\frac{1000}{773 \,.\, 13{,}6} \cdot \frac{b}{760}$ mm. Um soviel also sinkt die Quecksilbersäule $b$ bei der Erhebung um 1 m und der Barometerstand $b_1$ in der um 1 m höheren Lage beträgt noch

$$b_1 = b - \frac{1000}{773 \,.\, 13{,}6} \cdot \frac{b}{760} = \left(1 - \frac{1000}{773 \,.\, 13{,}6 \,.\, 760}\right) b = kb,$$

wenn man den eingeklammerten Zahlenwert, der ein von der Einheit nur wenig verschiedener echter Bruch ist, mit $k$ bezeichnet. Man findet also den Barometerstand an einer um 1 m höher liegenden Stelle, wenn man den vorhergehenden Barometerstand mit dem Zahlenfaktor $k$ multiplizirt. Steigt man also in Stufen von je 1 m empor, so findet man bei 2 m Erhebung den Barometerstand $b_2 = kb_1 = k \,.\, kb = k^2 b$, bei 3 m Erhebung $b_3 = kb_2 = k^3 b$ u. s. f., endlich den Barometerstand $b'$ bei $h$ Meter Erhebung

$$b' = k^h b,$$

wodurch das Gesetz der Abnahme des Barometerstandes mit der Höhe ausgesprochen ist. Man kann aus dieser „Barometerformel", wenn die Barometerstände $b$ und $b'$ an einem tiefer und an einem höher gelegenen Orte beobachtet sind, deren Höhenunterschied leicht berechnen. Es folgt nämlich hieraus:

$$h = -\frac{1}{\log k} (\log b - \log b'),$$

oder, wenn man für $k$ den obigen Zahlenwert einsetzt, in Metern:

$$h = 18\,400^{\text{m}} (\log b - \log b').$$

Dabei ist allerdings auf die Verschiedenheit der Temperatur, der Luftfeuchtigkeit und der Schwerewirkung an beiden Orten keine Rücksicht genommen, durch welche Umstände noch kleine Korrekturen bedingt werden.

84. **Manometer** nennt man Vorrichtungen zum Messen des Drucks eingeschlossener Gase. Das offene Manometer, gewöhnlich zur Messung von Drucken bestimmt, welche den Druck einer Atmosphäre nur wenig übersteigen, besteht in seiner einfachsten Form aus einer U-förmigen Röhre, deren einer Schenkel mit dem das Gas enthaltenden Raum in Verbindung steht, während der andere Schenkel dem Zutritt der Luft offen ist. In der Biegung der Röhre befindet sich Quecksilber, welches, wenn es in beiden Schenkeln gleich hoch steht, anzeigt, dafs der innere Druck dem äufseren Atmosphärendruck gleich ist. Übertrifft aber der innere Druck den äufseren, so steigt das Quecksilber in dem offenen Schenkel, bis der Druck der gehobenen Quecksilbersäule im Verein mit dem Atmosphärendruck dem inneren Gasdruck das Gleichgewicht hält. Die an einer Millimeterteilung abzulesende Höhe der Quecksilbersäule im offenen Schenkel über der Quecksilberkuppe im anderen Schenkel gibt also ein Mafs für den Überschufs des Gasdrucks über den gleichzeitigen Luftdruck, und müfste, wenn man den Gasdruck selbst durch die Höhe einer Quecksilbersäule ausgedrückt erfahren wollte, zu dem gleichzeitig abgelesenen Stande des Barometers hinzugefügt werden. Bei sehr geringem Überdruck, z. B. wenn der Druck in einer Leuchtgasleitung bestimmt werden soll, kann man das Manometer auch mit Wasser füllen, welches, da es 13,6 mal leichter ist, als Quecksilber, einen 13,6 mal gröfseren Ausschlag gibt. Bei sehr grofsem Druck würde das offene Manometer wegen der grofsen erforderlichen Höhe des zweiten Schenkels unbequem werden; man bedient sich daher in diesem Falle des geschlossenen Manometers (vgl. 71), bei welchem der zweite Schenkel oben zugeschmolzen ist und eine durch das Quecksilber abgesperrte Luftmenge enthält, deren Druck beim Steigen des Quecksilbers nach dem Mariotteschen Gesetz im umgekehrten Verhältnis ihres sich vermindernden Raumes zunimmt; dieser Druck wird in Atmosphären an der diesem Gesetz entsprechend eingetheilten Glasröhre abgelesen und gibt, dem Druck der gehobenen Quecksilbersäule hinzugerechnet, denjenigen des eingeschlossenen Gases oder Dampfes an. Das bei Dampfkesseln häufig angewendete Metallmanometer enthält eine gebogene Röhre aus dünnem elastischen Metallblech, welche sich, wenn man den Dampf in sie einströmen läfst, um so mehr streckt, je stärker der Druck des Dampfes ist, und vermöge dieser Formänderung einen Zeiger in Bewegung setzt, welcher auf einem durch Versuche eingeteilten Zifferblatt den Druck des Dampfes angibt.

85. **Luftpumpe** heifst jede Vorrichtung, welche den Zweck hat, die Luft in einem Raume zu verdünnen. Die um 1650 von Otto v. Guericke erfundene Kolbenluftpumpe erreicht diesen Zweck mittels eines in einem hohlen Cylinder (Stiefel) bewegten Pumpenkolbens.

Ihre wesentliche Einrichtung läfst sich am besten an der Handluftpumpe (Fig. 79) erläutern. Der Kolben *M* kann mittels eines an der Kolbenstange angebrachten Handgriffs in dem Stiefel *NN* luftdicht auf und ab bewegt werden. Der Kanal *kdefgh* führt vom Stiefel zu dem Raum, aus welchem die Luft gezogen werden soll; dieser besteht häufig aus einer am Rand sorgfältig abgeschliffenen Glasglocke, Recipient genannt, welche mit eingefettetem Rande auf den eben geschliffenen Teller *ii* luftdicht aufgesetzt werden kann. Der durchbohrte Kolben *OP* ist mit einem Ventil versehen, welches dadurch hergestellt wird, dafs man über die obere Öffnung des Stücks *P* ein Stück Schweinsblase bindet und in letzterer seitlich von der Öffnung zwei Einschnitte anbringt. Ein gleiches Ventil befindet sich am Boden des Stiefels bei *k*; beide Ventile öffnen sich durch einen Druck von unten und werden durch einen Druck von oben geschlossen. Zieht man den Kolben in die Höhe, während der Hahn *c* offen ist, so dehnt sich die in Recipient und Kanal enthaltene Luft in den ihr dargebotenen gröfseren Raum aus, indem sie durch ihren Druck das Bodenventil *k* öffnet; das Kolbenventil *P* bleibt unterdessen durch den von oben her gegen dasselbe drückenden stärkeren äufseren Luftdruck geschlossen. Drückt man nun den Kolben wieder hinab, so wird die im Stiefel zurückgebliebene Luft wieder verdichtet, versperrt sich durch Schliefsung des Bodenventils den Ausweg nach dem Recipienten und erreicht bald hinreichende Spannkraft, um dem äufseren Druck entgegen das Kolbenventil zu öffnen und durch die Bohrung *O* zu entweichen, während in Recipient und Kanal verdünnte Luft zurückbleibt. Ist der Kolben unten angekommen und somit die in den Stiefel herübergesaugte Luft hinausgeschafft, so wiederholt sich beim nächsten Kolbenzug dasselbe Spiel, und die bereits verdünnte Luft wird in demselben Verhältnis von neuem verdünnt. Hiernach sollte man meinen, dafs durch hinreichend viele Kolbenzüge freilich niemals vollkommene Luftleere, jedoch jeder beliebige Grad der Verdünnung erreicht werden könnte. Dies ist aber nicht möglich, sondern die Luftverdünnung erreicht bald eine Grenze, weil zwischen Boden- und Kolbenventil unvermeidlich ein kleiner Zwischenraum, der sogenannte schädliche Raum, vorhanden ist, in welchem stets Luft von atmosphärischer Dichte zurückbleibt. Denkt man sich nun während des Aufsteigens

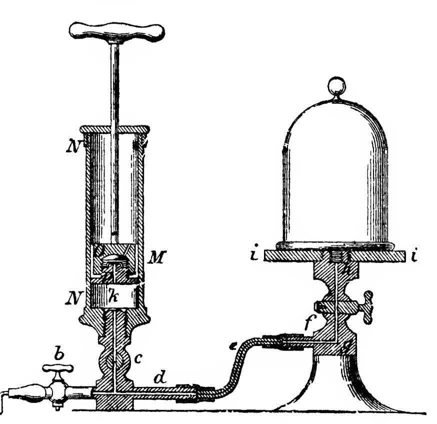


Fig. 79.
Handluftpumpe.

des Kolbens den Stiefel vom Recipienten abgesperrt, so wird sich die Luft des schädlichen Raumes im ganzen Stiefel verbreiten, und ihre Dichte wird sich jetzt zu derjenigen der atmosphärischen Luft verhalten wie der schädliche Raum zum Stiefelraum; ist nun die Luft im Recipienten bereits auf diesen Grad verdünnt, so wird von ihr nichts mehr in den Stiefel übergehen, und alles weitere Pumpen ist nutzlos. — Die abwechselnde Verbindung des Stiefels mit dem Recipienten und der freien Luft kann entweder wie hier durch Ventile (Ventilluftpumpen) oder durch einen Hahn (Hahnluftpumpen) bewirkt werden. Der Grad der erreichten Verdünnung wird durch die Barometerprobe bestimmt. Denken wir uns eine etwa 76 cm lange Glasröhre, welche mit ihrem unteren Ende in ein Gefäſs voll Quecksilber taucht, während sie oben umgebogen und mittels eines Stückchens Kautschukschlauchs mit einer durch den Hahn *b* verschlieſsbaren Seitenröhre des Luftpumpenkörpers verbunden ist. Wenn dieser Hahn offen ist, erhebt sich das Quecksilber in der Röhre, bis die gehobene Quecksilbersäule samt dem Druck der inneren verdünnten Luft dem äuſseren Luftdruck das Gleichgewicht hält. Man erfährt daher den inneren Druck, wenn man die Höhe der Quecksilbersäule in dieser Röhre von der gleichzeitig beobachteten Barometerhöhe abzieht. Hätte z. B. jene Quecksilbersäule eine Höhe von 740 mm bei einem Barometerstand von 750 mm, so entspricht der innere Druck einer Quecksilbersäule von 10 mm und beträgt daher nur $^{10}/_{750}$ oder $^{1}/_{75}$ des ursprünglichen atmosphärischen Drucks. Da nun nach dem Mariotteschen Gesetz die Dichte der Luft in demselben Verhältnis steht wie ihr Druck, so weiſs man hierdurch auch, daſs die Luft im Recipienten auf $^{1}/_{75}$ ihrer anfänglichen Dichte herabgebracht ist. Man kann die gleiche Messung auch in der Weise ausführen, daſs man die Phiole eines Phiolen-Barometers luftdicht mit dem Pumpenraume verbindet. Dann sinkt beim Pumpen das Quecksilber in der Barometerröhre. Die Länge der Quecksilbersäule über dem Niveau in der Phiole miſst dann direkt den noch vorhandenen Luftdruck im Recipienten. Da

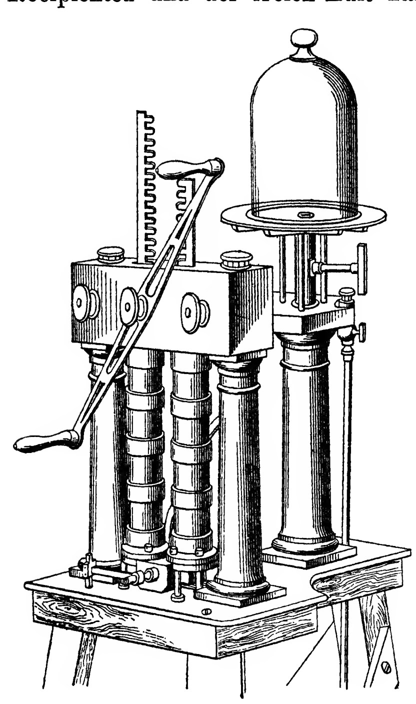
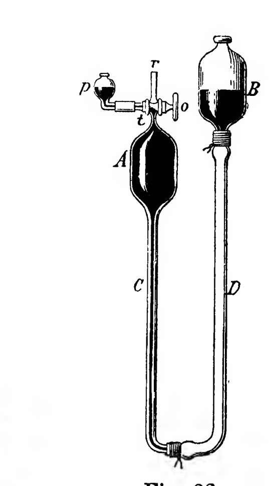


Fig. 80.
Zweistiefelige Hahnluftpumpe.

es sich nun bei den Luftpumpen-Versuchen immer nur um sehr geringe Drucke handelt, so kann man bei der letzten Art der Druckmessung das Manipuliren mit den langen Barometerröhren vermeiden, indem man der Barometerprobe die Gestalt eines abgekürzten Barometers gibt. Diese gewöhnlich an den Luftpumpen angebrachte Barometerprobe (Fig. 81) besteht aus einer U-förmigen Glasröhre mit einem offenen und einem zugeschmolzenen Schenkel. Das Quecksilber füllt die Biegung und den zugeschmolzenen Schenkel, welcher viel kürzer ist als bei einem gewöhnlichen Barometer, ganz aus und beginnt erst zu sinken, wenn der in den offenen Schenkel hereinwirkende Druck der verdünnten Luft weniger beträgt als der Quecksilberhöhe im zugeschmolzenen Schenkel entspricht; der Unterschied des Quecksilberstandes in beiden Schenkeln gibt alsdann den im Recipienten herrschenden Druck und somit auch die Dichte der



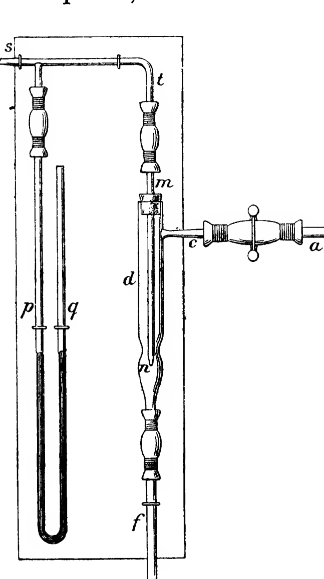




Fig. 81. Abgekürztes Barometer. Fig. 82. Quecksilberluftpumpe. Fig. 83. Bunsens Wasserluftpumpe.

daselbst noch vorhandenen Luft an. Zu physikalischen Versuchen werden gewöhnlich Luftpumpen mit zwei Stiefeln angewendet (Fig. 80, zweistiefelige Hahnluftpumpe), in deren einem der Kolben steigt, während derjenige im anderen niedergeht. Diese Bewegung wird durch ein Zahnrad bewirkt, welches beiderseits in die gezahnten Kolbenstangen eingreift. Bei zweistiefeligen Luftpumpen wird der Einfluſs des schädlichen Raumes dadurch verringert, daſs man, nachdem in gewöhnlicher Weise die Grenze der Verdünnung erreicht ist, durch Verstellung eines entsprechend gebohrten Hahns (Babinetscher Hahn bei Ventilluftpumpen, Gräſsmannscher Hahn bei Hahnluftpumpen) den Stiefel zur Rechten vom Recipienten absperrt und mit dem Stiefel links in Verbindung setzt, welcher nun noch allein Luft aus dem

Recipienten saugt; geht jetzt der Kolben links herab, so wird die unter ihm befindliche verdünnte Luft ohne Verdichtung in den Stiefel rechts hinübergeschafft, so daſs sich der schädliche Raum nur mit sehr verdünnter Luft füllen kann.

Man kann die Luft in einem Recipienten auch dadurch verdünnen, daſs man ihn mit dem leeren Raum über dem Quecksilber eines Barometers (Torricellische Leere) in Verbindung setzt; eine barometerähnliche Vorrichtung, welche durch Wiederholung dieses Verfahrens eine beträchtliche Luftverdünnung zu erzielen gestattet, bezeichnet man als Quecksilberluftpumpe (Geiſsler, 1857). Ein etwa 76 cm langes Glasrohr *C* (Fig. 82) trägt oben das weite Glasgefäſs *A*, während sein unteres Ende durch den Kautschukschlauch *D* mit dem oben offenen Glasgefäſs *B* in Verbindung steht. In eine Erweiterung der Glasröhre *tr*, in welche das Gefäſs *A* oben ausläuft, ist ein doppelt durchbohrter Hahn *o* eingeschliffen, durch welchen *A* nach Belieben mit dem bei *r* angefügten auszupumpenden Raum oder mit der nach der äuſseren Luft offenen Glaskugel *p* in Verbindung gesetzt werden kann. Während *A* nach *p* offen ist, wird das Gefäſs *B* so weit gehoben, daſs sich *A* vollständig und auch *p* teilweise mit Quecksilber füllt; wird nun durch geeignete Stellung des Hahnes *A* nach oben abgesperrt und das Gefäſs *B* allmählich gesenkt, so sinkt auch das Quecksilber, bleibt aber in der Röhre *C* um die Höhe des jeweiligen Barometerstandes über dem Quecksilberspiegel des Gefäſses *B* stehen; die Vorrichtung ist jetzt nichts anderes als ein Barometer mit einem sehr umfangreichen leeren Raum im Gefäſs *A*, mit welchem man nunmehr durch eine entsprechende Drehung des Hahnes den Recipienten in Verbindung setzt. Nachdem sich die Luft in den ganzen ihr nun zugänglichen Raum verbreitet hat, wird der Recipient wieder abgesperrt, durch den zweiten Hub des Gefäſses *B* die nach *A* aus dem Recipienten übergetretene Luft zunächst zusammengepreſst und sodann nach abermaliger Verstellung des Hahnes durch *p* hinausgetrieben, worauf sich dieselbe Reihe von Verrichtungen wiederholt. Die Quecksilberluftpumpen arbeiten zwar langsamer als die Kolbenluftpumpen, gestatten aber, einen weit höheren Grad der Luftverdünnung zu erreichen als diese.

Auf einem ganz anderen Prinzip beruht die Wasserluftpumpe (Luftsaugepumpe) von Bunsen (1868). Aus einem Wasserbehälter oder aus einer Wasserleitung strömt Wasser durch das Rohr *ac*, (Fig. 83) in das weitere Glasrohr *d*, ohne letzteres auszufüllen, und reiſst, indem es durch das 10 m tief hinabreichende Bleirohr *f* herabstürzt, durch seine Wucht die zwischen den einzelnen Wassertropfen befindliche Luft mit sich, so daſs Luft durch die Röhre *stmn*, welche mittels eines Kautschukpfropfens in das Rohr *d* luftdicht eingesetzt ist, nachströmen muſs, um ebenfalls durch das fallende Wasser mit hinabgerissen zu werden. Setzt man daher die Röhre *st* mit einem geschlossenen Raum in Verbindung, so wird aus diesem Luft herausgesaugt, und es entsteht in demselben eine Luftverdünnung, deren

Grad man an dem mit der Röhre in Verbindung stehenden offenen Manometer (*pq*) erkennt, indem das Quecksilber im Schenkel *p* steigt, in *q* sinkt. Bei den neueren Formen dieser Pumpe pflegt man die Verbindung umgekehrt zu machen, indem man das Wasser durch das Rohr *mm* aus der Spitze bei *n* in das Abfluſsrohr *f*, das nur kurz zu sein braucht, ausströmen und die Luft durch das Rohr *ac* absaugen läſst. Das Manometer muſs dann natürlich am Rohre *ac* befestigt sein. Die Wasserluftpumpe wird in chemischen Laboratorien zum raschen Filtriren und zum Trocknen der Niederschläge verwendet, indem man die Röhre *st* mit dem Innenraum eines Gefäſses verbindet, auf welches der Trichter mit dem Filter luftdicht aufgesetzt ist. Der überwiegende äuſsere Luftdruck treibt alsdann zuerst die Flüssigkeit und später Luft durch den Niederschlag hindurch und bewirkt so ein rasches Trocknen desselben. Auf dieselbe Wirkung herabstürzender Flüssigkeitstropfen gründet sich die Quecksilberluftpumpe von Sprengel; sie besteht aus einer oben mit einem Trichter versehenen Glasröhre, welche unten in Quecksilber taucht. Gieſst man Quecksilber in den Trichter, so reiſst dasselbe herabfallend Luft mit sich, und saugt durch ein seitlich unter dem Trichter mündendes Rohr die Luft aus dem zu entleerenden Raume heraus.

86. **Kompressionspumpe.** Jede Hahnluftpumpe kann, wenn man dem Hahn beim Arbeiten die entgegengesetzte Stellung gibt, so daſs der Kolben beim Hinaufgehen Luft aus der Atmosphäre schöpft und beim Hinabgehen in den Recipienten preſst, als Kompressionspumpe gebraucht werden, welche die Luft in demselben Verhältnis verdichtet wie bei umgekehrtem Gebrauch verdünnt. Gewöhnlich jedoch bedient man sich zur Verdichtung der Gase einfacherer zu diesem Zweck besonders konstruirter Pumpen.

In einem Hohlcylinder, an welchen der Recipient, in dem die Luft verdichtet werden soll, angeschraubt wird, bewegt sich ein luftdicht schlieſsender Kolben, welcher beim Hineinschieben die unter ihm abgesperrte Luft zusammendrückt und durch ein Ventil, das sich durch äuſseren Überdruck öffnet, in den Recipienten preſst. Beim Herausziehen hält der innere Überdruck dieses Ventil geschlossen, der Stiefel füllt sich durch eine seitliche Öffnung, sobald der Kolben dieselbe passirt hat, von neuem mit atmosphärischer Luft, welche bei dem nächsten Niedergange des Kolbens in den Recipienten geschafft wird etc. Durch eine solche Pumpe wird in dem hohlen Schaft der Windbüchse die Luft bis zum zehnfachen ihrer Spannkraft zusammengepreſst; wird nun durch den Drücker das im Schaft angebrachte Ventil für einen Augenblick geöffnet, so treibt der Druck der entweichenden Luft das in den Lauf geladene Geschoſs mit groſser Geschwindigkeit hinaus.

87. **Fortpflanzung des Druckes. Auftrieb.** Aus der leichten Verschiebbarkeit ihrer Teilchen folgen für die Fortpflanzung des Druckes in luftförmigen Körpern dieselben Gesetze wie in Flüssigkeiten. Auch in einem Gas pflanzt sich ein auf dasselbe ausgeübter

Druck nach allen Seiten mit der gleichen Stärke fort. Unter der Einwirkung der Schwerkraft kann eine Gasmasse, wie z. B. unsere Atmosphäre, nur dann im Gleichgewicht sein, wenn in einer und derselben wagerechten Schicht überall der gleiche Druck herrscht. Auch in das Wasser hinein pflanzt sich der auf der Oberfläche lastende Luftdruck fort, und fügt sich überall im Innern dem dort herrschenden hydrostatischen Druck hinzu. Man beobachtet dies z. B. an den Cartesianischen Tauchern oder Teufelchen, nach ihrem Erfinder Cartesius (Descartes) so genannt. Kleine, hohle Glasfiguren, häufig in Teufelsgestalt ausgeführt, welche teils mit Luft, teils mit Wasser gefüllt und mit einer seitlichen Öffnung versehen sind, schwimmen in einem mit Wasser gefüllten, oben mit einer Kautschukplatte luftdicht verschlossenen Cylinder. Durch einen Druck mit der Hand auf die Kautschukplatte wird die Luft im oberen Teil des Cylinders zusammengepreſst, ihr erhöhter Druck pflanzt sich durch das Wasser fort und treibt Wasser in den hohlen Glaskörper, wodurch dieser schwerer wird und sinkt. Läſst der Druck wieder nach, so treibt die in der Glasfigur zusammengepreſste Luft das eingedrungene Wasser wieder aus, und die dadurch leichter gewordene Figur steigt empor. Man hat es also in seiner Gewalt, die Taucher nach Belieben steigen oder sinken zu lassen. Desgleichen wird in einer Taucherglocke die Luft sich unter erhöhtem Druck befinden, indem der Druck gleich dem der äuſseren Luft, vermehrt um den Druck derjenigen Wassersäule sein muſs, welche von der Wasseroberfläche in der Glocke bis zum Wasserspiegel emporreicht.

Auch das Archimedische Prinzip gilt für die Gase ebensogut wie für die Flüssigkeiten, da ja in einem Gas infolge der Schwere der Druck nach unten zunimmt: jeder von Luft umgebene Körper verliert soviel von seinem Gewicht, wie die von ihm verdrängte Luftmenge wiegt. Um dies nachzuweisen, hängt man an einen kleinen Wagebalken einerseits eine Hohlkugel, andererseits ein kleines Bleigewicht, so daſs im lufterfüllten Raum der Balken wagrecht im Gleichgewicht schwebt. In Wirklichkeit ist die Kugel schwerer als das Bleistück, und das scheinbare Gleichgewicht wird nur durch den gröſseren Auftrieb herbeigeführt, den die umfangreichere Kugel durch die Luft erleidet. Dies zeigt sich sofort unter der Glocke der Luftpumpe; die Hohlkugel sinkt bei fortschreitendem Auspumpen immer tiefer herab, beim Einlassen von Luft aber stellt sich das scheinbare Gleichgewicht wieder her. Diese von Otto v. Guericke erfundene Vorrichtung wurde von ihm statt der damals noch unbekannten Barometerprobe benutzt, um den Grad der im Recipienten erreichten Verdünnung zu beurteilen, und wird daher das Guerickesche Manometer (auch Dasymeter) genannt.

Läſst man einen an einer Wage tarirt aufgehängten Glasballon in andere Gase tauchen, so senkt er sich oder steigt, je nachdem das Gas spezifisch leichter oder schwerer ist als Luft, weil der Auftrieb, den er durch das umgebende Gas erleidet, in jenem Falle kleiner, in diesem gröſser ist als in Luft. Bringt man durch Gewichte die

Wage jedesmal wieder zum Einspielen, so erfährt man, um wieviel ein dem Ballon gleiches Volumen des Gases mehr oder weniger wiegt als das gleiche Volumen Luft, und kann daraus die spezifischen Gewichte der Gase ermitteln (Lommel, 1886).

Bei genauen Wägungen mufs auf den Luftauftrieb Rücksicht genommen und dem gefundenen scheinbaren Gewicht der kleine in der Luft erlittene Auftrieb noch hinzugerechnet werden, um das wirkliche Gewicht, wie es eine Wägung im luftleeren Raum ergeben würde, zu finden.

Ist das Gewicht eines Körpers kleiner als das Gewicht des gleichen Rauminhaltes Luft, so steigt er mit einer Kraft, welche dem Überschufs des letzteren Gewichtes über das erstere gleichkommt, in der Atmosphäre empor und bleibt schwebend in derjenigen höheren Luftschicht, in welcher er ebenso schwer ist wie die von ihm verdrängte Luftmenge. Luftballons sind solche Körper, deren aus leichtem Stoff verfertigte Hülle, um jener Bedingung zu genügen, entweder mit erhitzter Luft (Montgolfier, 1782) oder — in neuerer Zeit ausschliefslich — mit einem spezifisch leichteren Gas, Wasserstoffgas oder Leuchtgas (Charles, 1783) gefüllt ist (Montgolfièren und Charlièren).

88. **Spezifisches Gewicht der Gase.** Wir betrachten unter dem im vorigen Abschnitt gewonnenen Gesichtspunkte noch einmal den oben (S. 118—119) beschriebenen Versuch der Wägung der Luft. Wird der Ballon in völlig leer gepumptem Zustande gewogen, so müfste man in Wahrheit das Gewicht der Ballonmasse vermindern um das Gewicht der ganzen, von dem geschlossenen Ballon verdrängten Luftmasse. Bei der Wägung in offenem Zustande dagegen erhält man das Gewicht der Ballonmasse vermindert nur um das Gewicht derjenigen Luft, die die Ballonmasse selbst verdrängt. Beide Wägungen unterscheiden sich also um das Gewicht der den Hohlraum des Ballons erfüllenden Luft; man wägt also in der That diese Luftmasse.

Um aus dem so bestimmten Gewicht $q$ einer Luftmasse vom Volumen $v$ der Hohlkugel das spezifische Gewicht der Luft beim Normaldrucke von 760 mm zu erhalten, mufs man berücksichtigen, dafs die äufsere Luft im allgemeinen nicht unter dem Normaldrucke, sondern unter dem Drucke $b$ steht, der durch den jeweiligen Barometerstand gegeben ist, und ferner, dafs beim Leerpumpen des Ballons nicht alle Luft entfernt wird, sondern noch ein Rest unter dem Drucke $b'$ übrig bleibt. Dieser Luftrest, der beim Drucke $b'$ das Volumen $v$ erfüllt, würde beim Drucke $b$ ein Raum $v' = vb'/b$ einnehmen, und die wirklich gewogene Luftmasse hätte beim Druck $b$ in Wahrheit nicht das Volumen $v$, sondern nur das Volumen $v - v'$. Um ihr Volumen $v_0$ beim Normaldruck 760 mm zu finden, hat man nach dem Mariotteschen Gesetze die Beziehung: $v_0 \cdot 760 = (v - v')\, b = v(b - b')$. Daraus ergibt sich das spezifische Gewicht der Luft unter dem Normaldrucke und bei der Temperatur, bei der die Wägung

ausgeführt wurde, zu $q/v_0$. (Über die Reduktion auf die Temperatur 0° siehe unter Wärme.)

Wägt man den Ballon mit anderen Gasen gefüllt, so findet man in entsprechender Weise deren spezifische Gewichte. Die folgende Tabelle gibt die Zahlenwerte der spezifischen Gewichte einiger Gase bei 0°, in der ersten Spalte bezogen auf Wasser. Da aber diese Zahlen sehr klein ausfallen, so bezieht man die spezifischen Gewichte der Gase lieber auf Luft (zweite Spalte) oder noch besser auf Wasserstoff als das leichteste aller Gase (dritte Spalte). Diese Zahlen geben also an, wieviel mal schwerer das Gas ist als Luft (oder Wasserstoff) von gleichem Druck und gleicher Temperatur.

| | Molekularformel und Molekulargewicht | Spezifische Gewichte der Gase, bezogen auf | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Wasser | Luft | Wasserstoff |
| Luft . . . . | — | 0,001293 | 1 | 14,45 |
| Wasserstoff . . | $H_2$ = 2 | 0,000090 | 0,0692 | 1 |
| Stickstoff . . | $N_2$ = 28 | 0,001251 | 0,9672 | 14 |
| Sauerstoff . . | $O_2$ = 32 | 0,001429 | 1,1052 | 16 |
| Chlor . . . . | $Cl_2$ = 70 | 0,003180 | 2,45 | 35,5 |
| Ammoniak . . | $NH_3$ = 17 | 0,000762 | 0,589 | 8,5 |
| Chlorwasserstoff | ClH = 36,5 | 0,001613 | 1,247 | 18 |
| Kohlenoxyd . . | CO = 28 | 0,001251 | 0,967 | 14 |
| Kohlensäure . | $CO_2$ = 44 | 0,001965 | 1,520 | 22 |

Vergleicht man die Zahlen der letzten Spalte mit denen der Molekulargewichte, so sieht man, dafs die letzteren durchgehends doppelt so grofs sind. Die Dichten der Gase stehen also in dem gleichen Verhältnis zu einander, wie ihre Molekulargewichte. Bezieht man daher die Gasdichte auf den Wasserstoff und nimmt dessen Dichte nicht gleich 1, sondern gleich 2, so stimmen die Gasdichten mit den Molekulargewichten überein.

Wenn sich die Gewichte gleicher Volumina der Gase wie ihre Molekulargewichte verhalten, so müssen alle gasförmigen Körper in gleichen Raumteilen bei gleichem Druck und gleicher Temperatur die gleiche Anzahl von Molekülen enthalten. (Gesetz von Avogadro, 1811.)

Die gleichen Gesetze, wie für die Gase, gelten für die Stoffe in gelöstem Zustande. Der osmotische Druck (78) entspricht dem Gasdruck. Wie dieser der Dichte des Gases, so ist jener der Konzentration, d. h. der Dichte des gelösten Stoffes proportional, und diese Dichten, berechnet unter den gleichen Druck- und Temperaturverhältnissen, sind den Molekulargewichten proportional, und ergeben, wenn die Dichte des Wasserstoffes = 2 gesetzt wird, unmittelbar die Zahlenwerte der Molekulargewichte. So ist der osmotische Druck einer einprozentigen Zuckerlösung bei 0° 493 mm Quecksilber. Eine Zuckerlösung, deren osmotischer Druck 760 mm betragen würde, mufs demnach 1,541 g in 100 ccm oder 0,01541 g Zucker in 1 ccm enthalten. 1 ccm Wasserstoff von dem gleichen Drucke wiegt 0,000090 g. Das Verhältnis beider Zahlen ist 171 und sagt aus, dafs die Dichte des gelösten Zuckers 171 mal gröfser ist als die Dichte des Wasserstoffes bei demselben Druck und derselben Temperatur. Nimmt

man die letztere = 2, so wäre die Dichte des gelösten Zuckers 342 und diese Zahl ist genau gleich dem Molekulargewicht des Zuckers (van't Hoff.)

Da für das Verhalten der Lösungen der osmotische Druck, ebenso wie bei den Gasen der Gasdruck, bestimmend ist, so empfiehlt es sich, die Konzentrationen nicht nach Gewichtsprozenten, wie es früher üblich war, sondern nach Gehalt an Molekülen zu rechnen. Gelöste Stoffe und Gase, deren Dichten sich wie ihre Molekulargewichte verhalten, haben in gleichem Volumen gleiche Molekülzahl und stehen unter dem gleichen Druck; sie sind äquimolekular und isotonisch. Als Einheit nimmt man dabei das „Gramm"-Molekül im Liter. Eine „normale Lösung" in diesem Sinne ist eine Lösung, welche die dem Molekulargewicht des gelösten Stoffes entsprechende Anzahl Gramme im Liter der Lösung enthält. Eine normale Zuckerlösung enthält 342 g im Liter und steht unter einem osmotischen Drucke von 22,4 Atmosphären. Den gleichen Druck üben 2 g Wasserstoff oder 32 g Sauerstoff oder 44 g Kohlensäure aus, wenn sie in einem Liter enthalten sind.

89. **Einige Anwendungen des Luftdruckes.** Der Heber (Schenkelheber, Saugheber) ist gewöhnlich eine gebogene Röhre mit zwei ungleich langen Schenkeln, welche dazu dient, eine Flüssigkeit aus einem Gefäfs mit Hilfe des Luftdruckes, der sie über den Gefäfsrand hebt, ausfliefsen zu lassen. Taucht nämlich die mit Flüssigkeit gefüllte Röhre (*asb*, Fig. 84) mit ihrem kürzeren Schenkel *sb* in die Flüssigkeit, so wirkt der Luftdruck in beiden Schenkeln mit gleicher Stärke nach aufwärts; im kürzeren Schenkel aber wirkt ihm der Druck einer Flüssigkeitssäule entgegen, welche vom Flüssigkeitsspiegel bis zum höchsten Punkt *s* der Biegung senkrecht empor-

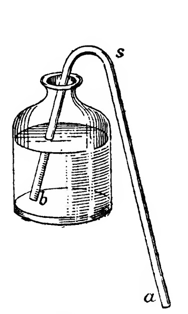


Fig. 84.
Heber.

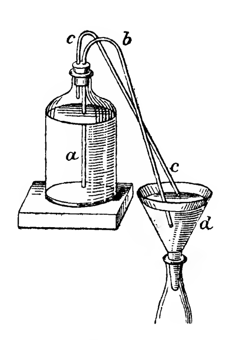


Fig. 85.
Waschflasche mit Heber.

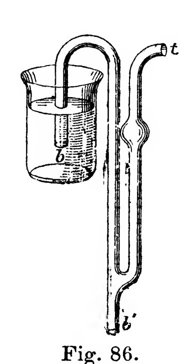


Fig. 86.
Giftheber.

reicht, während im längeren Schenkel eine höhere Säule, die von der Mündung *a* bis zur Biegung sich erhebt, entgegendrückt. Der noch übrig bleibende aufwärts gerichtete Druck ist demnach im kürzeren Schenkel gröfser als im längeren und zwingt die Flüssigkeit, in demselben aufzusteigen und aus der Mündung des längeren Schenkels so lange auszufliefsen, bis entweder die Mündung *b* des kürzeren Schenkels nicht mehr in die Flüssigkeit taucht, oder bis der Flüssigkeitsspiegel ebenso tief liegt wie die Mündung *a* des längeren Schenkels. Die Gröfse des Luftdrucks ist dabei gleichgiltig; die zur Bewegung der Flüssigkeit erforderliche Arbeit wird nur durch

den Niveauunterschied zwischen dem Flüssigkeitsspiegel im Gefäfse und der Mündung des Hebers geleistet. Damit jedoch der Heber wirksam sei, darf sein höchster Punkt nicht höher über dem Flüssigkeitsspiegel liegen, als die Höhe der Flüssigkeitssäule beträgt, die dem Luftdruck das Gleichgewicht hält; für Quecksilber darf also die Biegung höchstens 760 mm, für Wasser höchstens 10 m über dem Niveau des Gefäfses liegen. Unter der Glocke der Luftpumpe hört deshalb der Heber zu fliefsen auf, sobald der Druck der umgebenden Luft geringer wird als der Druck der Flüssigkeitssäule im kürzeren Schenkel. Dafs beim Heber der Luftdruck in der angegebenen Weise mitwirkt, kann man auch durch die Vorrichtung Fig. 85 nachweisen. Der Heber *ab*, dessen längerer Schenkel unter dem im Trichter *d* befindlichen Wasser mündet, ist mittels eines durchbohrten Korkes luftdicht in den Hals einer mit Wasser gefüllten Flasche eingesetzt; durch eine zweite Bohrung des Korkes geht eine Röhre *cc*, welche innen nahe unter dem Kork endigt. Hält man nun, nachdem der Heber zu fliefsen angefangen hat, die Röhre *cc* mit dem Finger zu, so wird durch den Heber noch etwas Wasser ausfliefsen, und da durch die verschlossene Röhre keine entsprechende Luftmenge in die Flasche eindringen kann, so mufs sich die in der Flasche enthaltene Luft ein wenig ausdehnen, und ihr druck vermindert sich, bis der Überdruck der äufseren Luft gegen Die innere dem Überdruck der längeren Wassersäule gegen die kürzere die Wage hält. Der Heber hört nun auf zu fliefsen, weil das in ihm enthaltene Wasser auf diese Weise im Gleichgewicht gehalten wird. Man kann diese Vorrichtung als selbstthätige Waschflasche praktisch verwerten, um beim Auswaschen von Niederschlägen das Filter stets bis zur nämlichen Höhe mit Wasser gefüllt zu erhalten, indem man die abwärts gebogene Röhre *cc* gerade im Niveau des Wassers im Trichter endigen läfst.

Man füllt den Heber gewöhnlich dadurch, dafs man, nachdem sein kürzerer Schenkel in die Flüssigkeit getaucht ist, am Ende *a* (Fig. 84) des längeren Schenkels mit dem Mund saugt; hierdurch wird die in der Röhre enthaltene Luft verdünnt, ihr Druck wird geringer als der äufsere Luftdruck, welcher, auf die Flüssigkeitsoberfläche im Gefäfs drückend, die Flüssigkeit in die Röhre zu steigen zwingt. Bei der Vorrichtung Fig. 85 genügt es, in die Röhre *cc* hineinzublasen; die Luft in der Flasche wird dadurch verdichtet, ihr Druck wird gröfser als der äufsere Luftdruck und treibt das Wasser in den Heber. Um den Heber bequem durch Saugen zu füllen, ohne befürchten zu müssen, dafs bei ätzenden oder giftigen Flüssigkeiten etwas in den Mund gelangt, bringt man an dem längeren Schenkel ein seitliches Saugrohr *t* (Fig. 86) an, an welchem man, während die Mündung *b′* verschlossen gehalten wird, saugt, bis die Flüssigkeit in die kugelige Anschwellung des Saugrohres zu steigen beginnt (Giftheber). Als Heber kann auch jeder Kautschukschlauch dienen.

Deckt man über ein mit Wasser gefülltes Trinkglas ein Papierblatt und kehrt das Glas um, so fliefst das Wasser nicht aus; denn der von unten gegen die Papierfläche wirkende Luftdruck, der ja eine Wassersäule von 10 m Höhe zu tragen vermöchte, hindert das Herabfallen des Wassers. Das Papier hat nur den Zweck, zu verhindern, dafs beim Umkehren Wasser ausfliefse und Luft statt dessen in das Gefäfs eindringe. Ist die Öffnung eines Gefäfses so eng, dafs sich daselbst ein abgerundeter Tropfen bilden kann, so bedarf es keines Papiers, sondern die Oberflächenspannung des Flüssigkeitshäutchens genügt, um das Eindringen von Luft zu verhüten. Darauf beruht der Stechheber, ein oben und unten enges, in der Mitte erweitertes, an beiden Enden offenes Rohr (Fig. 87), welches zum Herausheben von Flüssigkeitsproben aus Fässern und anderen Gefäfsen dient. Senkt man nämlich den Stechheber mit offenen Enden in die Flüssigkeit, so füllt er sich bis zu deren Niveau; hebt man ihn nun, nachdem man die obere Mündung mit dem Daumen luftdicht verschlossen hat, heraus, so fliefst zunächst ein wenig Flüssigkeit aus, die darüber befindliche Luft dehnt sich aus, und ihr Druck wird geringer als der äufsere Luftdruck, bis dieser dem inneren Luftdruck samt dem Druck der im Rohr enthaltenen Flüssigkeitssäule das Gleichgewicht zu halten vermag und sonach das fernere Ausfliefsen hindert. Man kann nun, indem man durch Lüften des Daumens der äufseren Luft den Zutritt gestattet, die Flüssigkeit nach Belieben in ein anderes Gefäfs abfliefsen lassen und durch abermaliges Verschliefsen den Abflufs sofort wieder hemmen. Um den Stechheber zu füllen, kann man auch sein unteres Ende in die Flüssigkeit tauchen und an der oberen Mündung saugen. Kleinere Stechheber, welche gewöhnlich, um gemessene Flüssigkeitsmengen überfüllen zu können, in Kubikcentimeter geteilt sind, nennt man Pipetten.

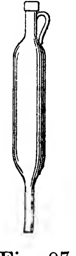


Fig. 87.
Stechheber.

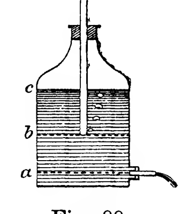



Fig. 88.
Mariottesche Flasche.

Die Mariottesche Flasche (1686) ist eine unten mit einer seitlichen Ausflufsmündung versehene, oben mit einem Kork luftdicht verschlossene Flasche, durch welchen eine an beiden Enden offene Glasröhre hineinragt (Fig. 88). Fliefst etwas Wasser aus der Flasche, so dehnt sich die im oberen Teil befindliche Luft aus, und ihr Druck wird geringer, bis der in die Glasröhre hineinwirkende äufsere Luftdruck den inneren samt dem Druck der vom unteren Ende der Röhre bis zum Wasserspiegel stehenden Wassersäule überwinden kann und Luftblasen aus dem unteren Röhrenende emporsteigen. Alsdann herrscht im Niveau *b* des unteren Röhrenendes, solange der Wasserspiegel *c* nicht unter *b* sinkt, der äufsere Luftdruck, und der Ausflufs des Wassers erfolgt nur unter dem Druck der Wasser-

säule *ab*, welche von der Ausflufsmündung bis zum Niveau des unteren Röhrenendes reicht. Man kann daher das Wasser mittels der Mariotteschen Flasche, obgleich der Wasserspiegel sinkt, unter gleichbleibendem Druck und daher mit gleichbleibender Geschwindigkeit ausfliefsen lassen. Je tiefer man die Röhre hineinschiebt, desto langsamer wird der Ausflufs und hört ganz auf, wenn man das Röhrenende ins Niveau der Mündung stellt.

Die Pumpen dienen zur Hebung des Wassers, meist mit Hilfe des Luftdrucks. Die Saugpumpe ist durch den Pumpbrunnen allbekannt. In dem Pumpenstiefel (*C*, Fig. 89) bewegt sich ein möglichst dicht anschliefsender, durchbohrter Kolben *K*, in dessen Bohrung eine Klappe oder ein Ventil (das Kolbenventil) angebracht ist, welches sich durch einen Druck von unten öffnet, durch einen Druck von oben aber schliefst. Ein in ganz gleicher Weise spielendes Ventil, das Bodenventil *V*, befindet sich am Boden des Stiefels, wo sich an diesen das unter den Wasserspiegel *U* des Brunnenschachtes hinabreichende Saugrohr *R* anschliefst. Das Spiel dieser beiden Ventile ist genau das gleiche, wie bei der Luftpumpe (85), nur dafs die in der Pumpe ursprünglich vorhandene Luft hier nicht fortgesetzt verdünnt wird, sondern statt dessen der auf den Wasserspiegel *U* wirkende äufsere Luftdruck Wasser in der Pumpe in die Höhe treibt. Bewegt sich der Kolben nach oben, so tritt Wasser aus dem Steigrohr durch das Bodenventil in den Stiefel; bewegt sich der Kolben darauf nach unten, so tritt das Wasser durch das Kolbenventil in den Raum über dem Kolben, und geht nun der Kolben wieder in die Höhe, so fliefst es aus dem Brunnenrohr aus, während gleichzeitig eine neue Wassermasse in den Stiefel eintritt. Der Höhe, bis zu welcher das Wasser durch eine Saugpumpe gehoben werden kann, ist durch die Gröfse des Luftdrucks eine unübersteigliche Grenze gesetzt. Der Luftdruck, welcher einer Quecksilbersäule von 76 cm Höhe das Gleichgewicht hält, vermag, da Wasser 13,6 mal leichter ist als Quecksilber, eine etwa 10 m hohe Wassersäule zu tragen und keine höhere. Befände sich daher das Bodenventil höher als 10 m über der Wasserfläche des Brunnenschachtes, so könnte kein Wasser in den Pumpenstiefel steigen, und es würde, wenn die Pumpe mit idealer Vollkommenheit gearbeitet wäre, unter dem Kolben ein leerer Raum (die Torricellische Leere) entstehen. Bei der geringeren Sorgfalt, mit welcher die Pumpen

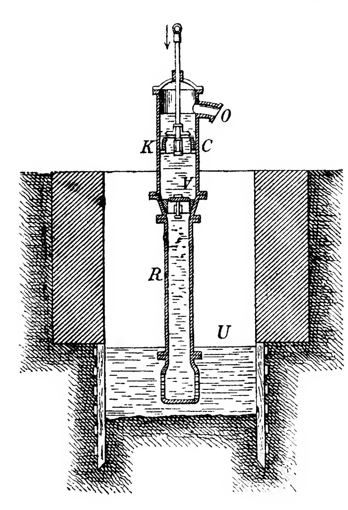


Fig. 89.
Saugpumpe.

unserer Brunnen ausgeführt sind, darf man das Bodenventil höchstens 7 bis 8 m über den Wasserspiegel legen, wenn die Pumpe gut arbeiten soll. Durch die Beobachtung der Florentiner Pumpenmacher, dafs das Wasser nicht höher steigen wollte, wurde Torricelli zum Nachweis und zur Messung des Luftdrucks durch das Barometer geführt, nachdem man bis dahin das Aufsteigen des Wassers in den Pumpen durch einen angeblichen Abscheu der Natur vor dem leeren Raum (horror vacui) erklärt hatte.

Bei der Druckpumpe ist der Kolben nicht durchbohrt: das durch Ansaugen oder durch Zuflufs in den Pumpenstiefel gelangte Wasser wird durch den Druck des niedergehenden Kolbens in ein unten vom Pumpenstiefel ausgehendes Steigrohr geprefst, welches mit einem nach auswärts sich öffnenden Ventil (Gurgelventil) versehen ist.

90. **Heronsball** (Heron, 50 n. Chr.) heifst ein zum Teil mit Wasser gefülltes Gefäfs (Fig. 90), in welches ein unter das Wasser hinabreichendes beiderseits offenes Rohr luftdicht eingesetzt ist. Ist der Druck der Luft im Gefäfs gröfser als der äufsere, so wird das Wasser in der Röhre gehoben und springt als Wasserstrahl aus der oberen Mündung. Um den inneren Druck gröfser zu machen als den äufseren, kann man entweder die Luft im Innern verdichten durch Einblasen von Luft in das durch einen Hahn verschliefsbare Rohr mit dem Mund oder mittels der Kompressions-Pumpe, oder die äufsere Luft verdünnen, indem man den Heronsball unter die Glocke der Luftpumpe bringt. Ein Heronsball einfachster Form ist die Spritzflasche, durch deren luftdicht schliefsenden, doppelt durchbohrten Kork zwei Glasröhren gesteckt sind, deren eine fast bis auf den Boden der Flasche reichende oben umgebogen und in eine Spitze ausgezogen ist, während die andere dicht unter dem Kork mündet; bläst man in die letztere, so springt das Wasser in feinem Strahl aus jener Spitze. Die sogenannte Siphonflasche für moussirende Getränke ist ebenfalls ein Heronsball, bei dem die Flüssigkeit durch den Druck der aus ihr sich entwickelnden Kohlensäure emporgetrieben wird. Der Windkessel der Feuerspritze ist nichts anderes als ein grofser Heronsball, in welchen mittels zweier abwechselnd wirkender Druckpumpen Wasser hineingeprefst und dadurch die im Innern des Windkessels eingesperrte Luft zusammengedrückt wird; öffnet man dann den Hahn des Steigrohrs, so treibt die innere Luft vermöge ihres erhöhten Drucks das Wasser in ununterbrochenem, kräftigem Strahl heraus. Heronsbrunnen nennt man einen Heronsball, in welchem die Luft durch den Druck einer Wassersäule zusammengeprefst wird (Zimmerfontainen).

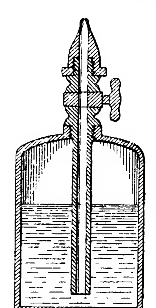


Fig. 90.
Heronsball.

91. **Stofsheber** (hydraulischer Widder) heifst eine von Montgolfier (1797) erfundene Wasserhebemaschine, welche durch die Wucht

des fliefsenden Wassers einen Teil desselben auf eine gröfsere Höhe hebt, als diejenige ist, von welcher das Wasser herabkommt. Er besteht aus einem Windkessel (Heronsball) *r*, in welchen das Steigrohr *d*, das bei *e* über dem zur Aufnahme des gehobenen Wassers bestimmten Behälter *l* mündet, luftdicht eingesetzt ist (Fig. 91). Der Windkessel ist unten mit einem Ventil *c* versehen, das sich nach oben öffnet; am freien Ende der Leitungsröhre *b*, welche von dem Behälter *a*, etwa einem Teich oder Flufs, herabkommt, befindet sich ein Ventil *v*, welches sich vermöge seines Gewichts nach unten öffnet. Das durch die Röhre *b* herabfliefsende Wasser reifst, wenn es eine gewisse Geschwindigkeit erlangt hat, das Ventil *v* mit sich und schliefst es, hebt nun durch seine Wucht bei dieser plötzlichen Hemmung das Ventil *c*, dringt in den Windkessel und drückt die Luft in demselben zusammen, bis sich das Ventil durch den stärkeren Druck von oben schliefst. Sobald nun das Wasser zur Ruhe gekommen, öffnet sich das Ventil *v* durch sein eigenes Gewicht und läfst Wasser ausfliefsen; dadurch kommt die Wassermasse wieder in Bewegung, schliefst das Ventil *v* abermals, stöfst das Ventil *c* auf und prefst unter regelmäfsiger Wiederholung des Spiels der Ventile die Luft in dem Windkessel immer mehr zusammen, bis dieselbe im stande ist, vermöge ihres Drucks eine Wassermenge, die jedoch geringer ist als die gleichzeitig unten abfliefsende, durch die Steigröhre in den oberen Behälter zu fördern.

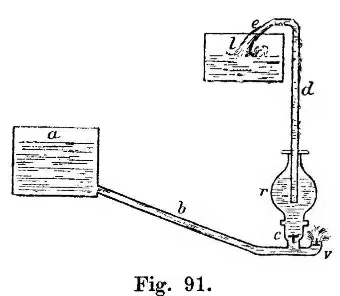



Fig. 91.
Stofsheber.

92. **Ausströmen der Gase.** Ein Gas strömt aus einem dasselbe rings umschliefsenden Behälter, in dessen dünner Wand eine Öffnung angebracht ist, in den äufseren Raum aus, wenn der Druck innen gröfser ist als aufsen. Für diesen Vorgang galten die gleichen Betrachtungen wie oben (67) für das Ausströmen einer Flüssigkeit aus einer Öffnung in der Wand eines Gefäfses. Ist $p$ der Überdruck des Gases in dem Behälter über den äufseren Druck, so wird das Gas mit der Geschwindigkeit

$$v = \sqrt{\frac{2p}{s}}$$

ausströmen.

Es gilt also unter den gemachten Voraussetzungen das folgende von Graham durch Versuche bewiesene Gesetz: die Ausströmungsgeschwindigkeit eines Gases ist der Quadratwurzel aus dem Überdruck direkt, der Quadratwurzel aus dem spezifischen Gewichte umgekehrt proportional.

Wenn daher verschiedene Gase unter gleichem Druck ausströmen, so verhalten sich die Quadrate ihrer Ausströmungsgeschwindigkeiten umgekehrt wie ihre spezifischen Gewichte, oder was dasselbe heifst, ihre spezifischen Gewichte verhalten sich wie die Quadrate der Ausströmungszeiten gleicher Raumteile. Auf dieses Verhalten hat Bunsen ein sinnreiches Verfahren zur Bestimmung der spezifischen Gewichte der Gase gegründet. Das Gas befindet sich in der Glasröhre *AA* (Fig. 92), die sich oben in ein Röhrchen *B* verengt, in welches bei *o* ein dünnes Platinblättchen mit einer feinen Öffnung eingeschmolzen ist, aus der nach Wegnahme des Stöpsels *s* das Gas ausströmt. Die Röhre *AA* wird, während der Stöpsel aufgesetzt ist, so tief in das Quecksilber des Standgefäfses *CC* hinabgedrückt, dafs die Spitze *r* des gläsernen Schwimmers *DD* genau im äufsersten Niveau *C* des Quecksilbers erscheint. Wird der Stöpsel weggenommen, so beginnt das Gas unter dem Überdruck des äufseren über das innere Quecksilber auszuströmen, und man braucht jetzt nur die Zeit zu beobachten, die von der Wegnahme des Stöpsels an vergeht, bis die am Schwimmer angebrachte Marke *t* die äufsere Quecksilberoberfläche erreicht hat. Hat man z. B. auf diese Weise gefunden, dafs gleiche Raumteile von atmosphärischer Luft und von Knallgas beziehungsweise 117,6 und 75,6 Sekunden zum Ausströmen gebrauchen, so ist das spezifische Gewicht des Knallgases auf Luft bezogen $= (75,6)^2 : (117,6)^2 = 0,413$.

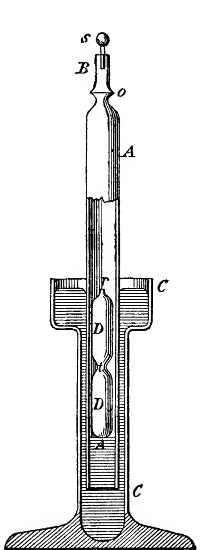


Fig. 92.
**Bunsens Apparat zur Bestimmung der spezifischen Gewichte der Gase.**

93. Die **pneumatische Wanne** dient dazu, Gase unvermischt mit atmosphärischer Luft in einem Gefäfse aufzufangen. Würde man das Gas aus dem Apparat, in welchem es sich entwickelt, in ein sogenanntes leeres, d. h. mit atmosphärischer Luft gefülltes, Gefäfs strömen lassen, so würde man es nicht rein, sondern mit atmosphärischer Luft gemischt erhalten. Man füllt daher das Gefäfs, welches das Gas aufnehmen soll, z. B. eine an einem Ende zugeschmolzene Glasröhre, mit einer Flüssigkeit (Wasser oder Quecksilber), welche man die Sperrflüssigkeit nennt, bringt die verschlossen gehaltene Mündung der Röhre unter die Oberfläche der nämlichen, in einem weiten wannenartigen Gefäfs bereit gehaltenen Flüssigkeit und führt in die nun wieder geöffnete Mündung das aufwärts gebogene Ende eines vom Gasentwickelungsapparat kommenden Glasrohrs ein. Indem die aufsteigenden Gasblasen die Flüssigkeit aus der Röhre verdrängen, sammelt sich in derselben das reine, unvermischte Gas. Damit die Gasblasen aufzusteigen vermögen, mufs in dem Entwickelungsapparat ein Druck herrschen,

welcher den Druck der in der Wanne über der Rohrmündung stehenden Flüssigkeitssäule zu überwinden vermag.

94. **Gasometer** nennt man Apparate zum Aufbewahren und beliebigen Ausströmenlassen von Gasen. Das Laboratoriumsgasometer (Pepys, 1802) besteht aus einem luftdicht geschlossenen cylindrischen Blechgefäſs *A* (Fig. 93), welches mit einem darüber befindlichen oben offenen Gefäſs *B* durch Röhren, welche mit den Hähnen *a* und *b* verschlieſsbar sind, in Verbindung steht. Die Röhre *a* reicht vom Boden des oberen Gefäſses fast bis zum Boden des unteren, die Röhre *b* von der Decke des unteren bis zum Boden des oberen.

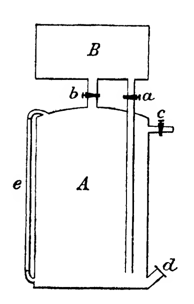



Fig. 93.
Gasometer für Laboratorien.

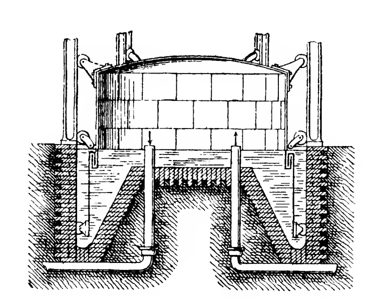


Fig. 94.
Gasometer für Leuchtgasfabriken.

Am unteren Gefäſs ist oben ein seitliches Ausfluſsrohr mit dem Hahn *c*, unten eine mit einem Pfropfen verschlieſsbare Öffnung *d* und endlich das Wasserstandsrohr *e* angebracht. Man füllt zunächst das untere Gefäſs ganz mit Wasser, welches man in das obere eingieſst, während die Öffnung *d* geschlossen, die Hähne *a*, *b* und *c* offen sind. Man kann nun, nachdem die Hähne wieder geschlossen sind, bei *d* öffnen, ohne daſs das Wasser ausflieſst, weil dasselbe vom äuſseren Luftdruck getragen wird. In die Öffnung *d* führt man nun das aufwärts gebogene Ende des Gasentwickelungsrohrs, aus welchem das Gas in Blasen aufsteigt und das Gefäſs *A* füllt, indem es das Wasser verdrängt und durch die Öffnung *d* neben dem Gasentwickelungsrohr auszuflieſsen zwingt. Ist das Gefäſs *A* nahezu mit Gas gefüllt, so wird die Öffnung *d* wieder verschlossen. Öffnet man nun den Hahn *a*, so strömt Wasser aus dem immer gefüllt zu haltenden Gefäſs *B* in das Gefäſs *A* und preſst das in letzterem enthaltene Gas zusammen mit einem Druck, welcher dem Höhenunterschied der Wasserspiegel im oberen und unteren Gefäſs entspricht. Vermöge dieses inneren Überdrucks kann man das Gas entweder durch die Röhre *c* ausströmen, oder in ein zuerst mit Wasser gefülltes und in dem nun als pneumatische Wanne dienenden Behälter *B* umgestülptes Gefäſs durch die Röhre *b* übertreten lassen. Das groſse Gasometer der Leuchtgasfabriken (Fig. 94) besteht aus einer

ausgemauerten, mit Wasser gefüllten cylindrischen Grube, in welche ein oben geschlossener, unten offener, aus Eisenblech zusammengenieteter, durch Gegengewichte balancirter, geräumiger Cylinder taucht. Unter demselben münden zwei nach oben umgebogene, mit Hähnen verschliefsbare Rohre; durch das eine tritt das von dem Entwickelungsapparat kommende Gas ein und hebt durch seinen Druck den anfangs ganz hinabgetauchten Cylinder, welcher dann, nachdem das andere Rohr geöffnet und das Zuführungsrohr geschlossen, vermöge seines eigenen Gewichts niedersinkend, das Gas in die Leitung zum Verbrauch hinaustreibt.

95. **Gasmesser** sind Vorrichtungen zum Messen des Rauminhalts der durch eine Gasleitung strömenden Gasmenge. Der sogenannte „nasse" Gasmesser besteht aus einem cylindrischen Gehäuse aus Blech oder Gufseisen (Fig. 95), in welchem sich eine in vier Fächer geteilte Trommel, deren Fächer mit dem Innenraum des Gehäuses durch die Öffnungen *a* in Verbindung stehen, um ihre wagrechte Achse drehen kann. Das Gehäuse wird bis zur Hälfte mit Wasser gefüllt, welchem man, um das Gefrieren zu hindern, Glycerin oder Weingeist zusetzt. Das Gas strömt von der Leitung her in der Mitte *b* ein; läfst man es durch die oben auf dem Gehäuse angebrachte Öffnung *c* nach dem Brenner hin ausströmen, so wird der Gasdruck auf der Seite des aus der Flüssigkeit ausgehobenen Faches geringer, der Flüssigkeitsspiegel stellt sich etwas höher als in den gegenüberliegenden Fächern, diese heben sich eins nach dem anderen aus der Flüssigkeit und entleeren ihren Inhalt, dem Verbrauch der Flamme entsprechend, in den oberen Teil des Gehäuses. Haben sich die vier Fächer entleert, so hat die Trommel eine Umdrehung gemacht. Die Achse der Trommel setzt ein Zählwerk in Bewegung, auf dessen Zifferblatt die Anzahl der Umdrehungen, mithin auch der Rauminhalt des innerhalb bestimmter Zeit durchgeströmten Gases abgelesen werden kann.

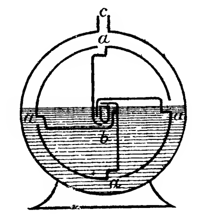



Fig. 95.
Gasmesser.

96. **Diffusion der Gase.** Setzt man zwei Gefäfse, von denen das obere Wasserstoffgas, das untere die 22mal schwerere Kohlensäure enthält, miteinander in Verbindung, so werden nach einer gewissen Zeit die zwei Gase in beiden Gefäfsen gleichmäfsig verbreitet sein und ein Gasgemenge von durchaus gleicher Zusammensetzung bilden. Jedes Gas verbreitet sich in dem ganzen dargebotenen Raum allmählich so, als ob das andere nicht vorhanden wäre, vorausgesetzt, dafs sie nicht chemisch aufeinander einwirken. Deshalb ist der Druck eines Gasgemisches gleich der Summe der Drucke der einzelnen Gase. (Gesetz von Dalton, 1803). Man nennt diesen Vorgang Diffusion. Aus der Diffusion erklärt es sich, dafs in unserer Atmosphäre das schwerere Sauerstoffgas und

das leichtere Stickstoffgas in allen Höhenschichten stets das gleiche Mischungsverhältnis bewahren.

Werden zwei Gase durch eine poröse Scheidewand, z. B. durch eine dünne Platte aus unglasirtem gebrannten Thon oder aus Gips, voneinander getrennt, so findet der Austausch der beiden Gase durch die Poren der Scheidewand statt, wobei das spezifisch leichtere Gas schneller hindurchdringt als das spezifisch schwerere. Über eine poröse Thonzelle (wie man sie für galvanische Elemente verwendet), in deren nach unten gekehrte Öffnung mittels eines Korkes ein **U**-förmiges, in der Biegung mit Wasser gefülltes Glasrohr (Manometer) eingesetzt ist, werde eine mit Gaszuleitungsrohr versehene Glasglocke gestülpt. Läfst man Leuchtgas, welches spezifisch leichter ist als Luft, in die Glocke strömen, so diffundirt dasselbe schneller durch die Thonwand in die Zelle, als die Luft aus ihr heraus, und erhöht den Druck im Innern; das Wasser sinkt im inneren Schenkel des Manometers und steigt im äufseren Schenkel. Nimmt man die Glocke weg, so geht das Leuchtgas, mit welchem die Zelle jetzt erfüllt ist, schneller zur umgebenden Luft hinaus als diese hinein, der Druck im Innern wird geringer, und die Wassersäule steigt im inneren und fällt im äufseren Schenkel. Das Umgekehrte findet statt, wenn man die spezifisch schwerere Kohlensäure in die Glocke leitet. Führt man von der Thonzelle in einen verkorkten, zum Teil mit Wasser gefüllten Kolben eine Röhre, die unmittelbar unter dem Korke mündet, während durch eine zweite Bohrung des Korkes eine bis zum Boden des Gefäfses reichende, oben etwas verengte Röhre gesteckt ist, so dafs der Kolben einen Heronsball bildet, so springt das Wasser aus der letzteren Röhre in hohem Strahle heraus, sobald man Leuchtgas in die Glocke leitet.

Man hat dieses Verfahren zur Erkennung der Anwesenheit von Grubengas (schlagenden Wettern) in der Luft der Kohlenbergwerke nutzbar zu machen gesucht. Bringt man nämlich ein mit einer porösen Thonplatte verschlossenes Gefäfs, welches mit dem einen Schenkel einer **U**-förmigen mit Quecksilber gefüllten Glasröhre in Verbindung steht, in die mit jenem Gas vermischte Grubenluft, so wird infolge der schnelleren Diffusion des spezifisch leichteren Grubengases der Druck im Innern des Gefäfses vermehrt, die Quecksilbersäule im anderen Schenkel steigt und kann nun, indem sie durch Schliefsung eines galvanischen Stroms eine elektrische Klingel in Bewegung setzt, die drohende Gefahr verkünden.

Nach Graham verhalten sich die Diffusionsgeschwindigkeiten zweier Gase umgekehrt wie die Quadratwurzeln ihrer spezifischen Gewichte; Wasserstoffgas z. B. durchdringt die Scheidewand 4 mal schneller als das 16 mal schwerere Sauerstoffgas.

97. **Absorption der Gase.** Flüssigkeiten sind fähig, Gase, die mit ihnen in Berührung stehen, in sich aufzunehmen, aufzulösen. Man nennt diesen Vorgang Absorption.

Das sogenannte Sodawasser ist nichts anderes als Wasser, welches Kohlensäure absorbirt hat und dieses Gas gleichsam aufgelöst in sich enthält. 1 Liter Wasser löst bei 15° C. stets 1 Liter Kohlensäure, unter welchem Druck auch das Gas stehen mag; da nun nach dem Mariotte'schen Gesetze bei dem doppelten, dreifachen, vierfachen etc. Druck in demselben Raum die doppelte, dreifache, vierfache etc. Gasmenge enthalten ist, so folgt, dafs (bei unveränderter Temperatur) das Gewicht der von einer bestimmten Flüssigkeit verschluckten Gasmenge in demselben Verhältnis steht wie der Druck, unter welchem die Absorption stattgefunden hat (Henrys Gesetz, 1803). Bei der Sodawasserfabrikation wird der Druck, welcher nötig ist, um das Wasser mit einer genügenden Menge Kohlensäure zu sättigen, entweder durch das in engem Raum sich entwickelnde Gas selbst oder durch geeignete Pumpwerke hervorgebracht. Die Champagnerbereitung beruht ebenfalls darauf, dafs die bei der Gärung gebildete Kohlensäure unter dem hohen Druck, welchen sie in der verkorkten Flasche erreicht, in der Flüssigkeit absorbirt bleibt. Dieser Druck ist es, welcher den gelockerten Kork mit einem Knall hinaustreibt; aus der Flüssigkeit, welche in der geöffneten Flasche nur noch dem gewöhnlichen Luftdruck ausgesetzt ist, entweicht jetzt die Kohlensäure, welche vorher durch den hohen Druck in ihr festgehalten war: der Champagner schäumt. Aus abgestandenem Bier, welches nicht mehr schäumt, entweicht unter der Glocke der Luftpumpe mit starkem Aufschäumen die Kohlensäure, die bei atmosphärischem Druck in der Flüssigkeit noch absorbirt geblieben war.

Das Absorptionsvermögen ist verschieden je nach der Natur der Flüssigkeit und des Gases, welche aufeinander einwirken. Besonders gierig wird Ammoniakgas von Wasser verschluckt. Durch den Kork eines mit diesem Gas gefüllten Kolbens sei eine Glasröhre gesteckt, deren inneres Ende offen, deren äufseres mit einem kleineren Korke verschlossen ist. Taucht man letzteres Ende in ein Gefäfs mit Wasser und öffnet es, so stürzt das Wasser wie ein Springbrunnen in den Kolben und erfüllt ihn bald ganz, nachdem sämtliches Gas absorbirt ist. Hat man das Wasser in dem Gefäfs mit angesäuerter Lackmustinktur rötlich gefärbt, so wird es im Innern der Flasche durch die alkalische Wirkung der gebildeten Ammoniakflüssigkeit blau. Die käufliche Ammoniakflüssigkeit (Salmiakgeist) ist mit absorbirtem Ammoniakgas, ebenso die käufliche Salzsäure mit Chlorwasserstoffgas gesättigtes Wasser.

Ein Raumteil Wasser absorbirt bei 15° C. 727 Raumteile Ammoniakgas, 450 Chlorwasserstoff, 43,5 schweflige Säure, $3^1/_4$ Schwefelwasserstoff, 1 Kohlensäure, $^1/_{34}$ Sauerstoffgas, $^1/_{70}$ Stickstoffgas; 1 Raumteil Alkohol dagegen verschluckt 3,2 Raumteile Kohlensäure. Diese Zahlen, welche ausdrücken, wieviel Raumteile eines Gases von einem Raumteil einer Flüssigkeit verschluckt werden, unabhängig vom Druck, nennt man Absorptionskoëfficienten. Aus einem Gemenge von Gasen absorbirt eine Flüssigkeit soviel von jedem einzelnen Gas,

als dem Druck entspricht, welchen dieses Gas ausüben würde, wenn es allein vorhanden wäre (Daltons Gesetz). Es wird daher z. B. die absorbirte Kohlensäuremenge nicht vergröfsert, wenn man in den über dem Wasser befindlichen, mit Kohlensäure erfüllten Raum ein anderes Gas, z. B. atmosphärische Luft, hineinprefst. Die atmosphärische Luft ist bekanntlich ein Gemenge von 21 Raumteilen Sauerstoffgas mit 79 Raumteilen Stickstoffgas; wären die Absorptionskoëfficienten dieser beiden Gase einander gleich, so müfste die im Wasser absorbirte Luft in demselben Verhältnis aus ihnen zusammengesetzt sein. Da jedoch der Sauerstoff eine gröfsere Absorptionsfähigkeit besitzt als der Stickstoff, so ist die im Wasser aufgelöste Luft verhältnismäfsig reicher an Sauerstoff als die gewöhnliche Luft, indem sie von diesem für die Atmung notwendigen Gas 35 Prozent (statt nur 21 Prozent) enthält gegenüber 65 Prozent des nicht atembaren Stickstoffs. Dieses Verhalten ist von Wichtigkeit für die mit Kiemen versehenen Wassertiere, welche die im Wasser absorbirte Luft atmen. Das Absorptionsvermögen nimmt in der Regel mit steigender Temperatur ab. Das Wasser z. B. verschluckt bei $0^0$:1,8, bei $15^0$:1, bei $20^0$:0,9 Raumteil Kohlensäure. Beim Erwärmen entweicht daher ein Teil des Gases aus einer gashaltigen Flüssigkeit, und durch Sieden werden die meisten absorbirten Gase vollständig ausgetrieben. Andererseits geben manche Metalle, namentlich Silber und Kupfer, welche im geschmolzenen Zustand Sauerstoff absorbiren, das verschluckte Gas beim Erkalten wieder ab, wobei das aus dem noch flüssigen Metall stürmisch entweichende Gas feine Tropfen des Metalls umherschleudert. Man nennt diese Erscheinung Spratzen. Auch feste Metalle vermögen Gase zu verschlucken und, in sich eingeschlossen (okkludirt), zu beherbergen; Palladiummetall z. B., welches eine Zeitlang in verdünnter Schwefelsäure als negativer Pol einer galvanischen Säule gedient hat, kann das 936fache seines Rauminhalts an Wasserstoffgas in sich aufnehmen; dieser Vorgang wird „Okklusion“ genannt. Platin und Eisen absorbiren in der Glühhitze Wasserstoffgas, letzteres besonders leicht auch Kohlenoxydgas, und behalten diese Gase dann auch bei gewöhnlicher Temperatur zurück.

Übrigens besitzen alle festen Körper die Eigenschaft, die sie umgebenden Gase an ihrer Oberfläche zu verdichten; jeder Körper, welcher eine Zeitlang an der Luft oder in einem anderen Gas gelegen hat, bedeckt sich an seiner Oberfläche mit einer verdichteten Gasschicht, welche durch Adhäsion fest an ihm haftet und nur durch Erhitzen oder sorgfältiges Putzen mit Alkohol, ausgeglühtem Tripel, Kohlenpulver etc. entfernt werden kann. Da diese Art der Absorption, welche man passender Adsorption nennt, von der Gröfse der Oberfläche des wirksamen Körpers abhängt, so zeigt sie sich in besonders hohem Grade bei porösen Körpern, wie z. B. Holzkohle, weil hier die Innenwände der unzähligen feinen Höhlungen eine im Verhältnis zum Rauminhalt des Körpers aufserordentlich grofse Oberfläche darbieten. Bringt man in eine über Quecksilber in der pneu-

matischen Wanne mit Kohlensäure gefüllte Glasröhre von unten her durch das Quecksilber ein Stück frisch ausgeglühter Holzkohle, so verschluckt diese allmählich das Gas, und das Quecksilber samt der auf ihm schwimmenden Kohle steigt nach. Auf diese Weise findet man, dafs Buchsbaumkohle, welche durch Ausglühen von der in ihr absorbirt gewesenen Luft befreit worden, das 35fache ihres Rauminhalts an Kohlensäure, das 90fache an Ammoniak einzuschlucken vermag. Da das absorbirte Gas verdichtet wird, jede Verdichtung aber von Wärmeentwickelung begleitet ist, so findet bei jeder Absorption Erwärmung statt, welche sich unter Umständen bis zur Glühhitze steigern kann. Daraus erklärt sich die bisweilen sich ereignende Selbstentzündung der zum Behuf der Schiefspulverbereitung fein gemahlenen und zu grofsen Haufen aufgeschütteten Holzkohle. Das in den Apotheken als Heilmittel geführte, auf chemischem Weg dargestellte fein gepulverte Eisen absorbirt, wenn man es ausschüttet, den Sauerstoff der Luft so heftig, dafs es sich entzündet und verbrennt. Körper, welche diese Eigenschaft besitzen, heifsen Pyrophore oder Luftzünder. Läfst man auf Platinschwamm (d. h. feinporöses Platin, wie es durch Glühen von Platinsalmiak gewonnen wird), welcher Sauerstoff aus der Luft aufgenommen und in seinen Poren verdichtet hat, Wasserstoffgas strömen, so wird auch dieses Gas absorbirt unter solcher Wärmeentwickelung, dafs der Platinschwamm glühend und der Wasserstoffstrom entzündet wird; hierauf gründet sich Döbereiners Zündmaschine. Viele Körper besitzen das Vermögen, den Wasserdampf aus der Luft zu absorbiren und ihn zu Wasser zu verdichten, z. B. die koncentrirte Schwefelsäure; feste Körper werden dadurch feucht und zerfliefsen endlich in dem absorbirten Wasser, z. B. Kochsalz, Pottasche, Chlorcalcium. Gewöhnliches (alkalireiches) Glas überzieht sich an seiner Oberfläche mit einer dünnen Wasserschicht. Man nennt solche Körper hygroskopisch; viele Körper aus dem Tier- und Pflanzenreich, z. B. Haare, Fischbein, Darmsaiten, Holz etc., zeigen sich ebenfalls hygroskopisch, indem sie aus feuchter Luft Wasser in sich aufnehmen und dadurch anschwellen.

---

# V. Wärme.

98. **Wärme** nennen wir die Ursache der Zustände eines Körpers, die wir bei Berührung desselben durch gewisse Nerven unserer Haut empfinden und als kalt, kühl, lau, warm, heifs unterscheiden. Der Reihenfolge dieser Ausdrücke entsprechen stufenweise Unterschiede in dem Wärmezustande oder der Temperatur der Körper. Die Beurteilung der Temperatur durch den Tastsinn ist jedoch unsicher, weil unsere Wärmeempfindung nicht nur von dem Zustand des berührten Körpers, sondern auch von dem Zustand des Empfindungsorganes abhängig ist. Taucht man die eine Hand in warmes, die andere in kaltes und dann beide gleichzeitig in laues Wasser, so erscheint letzteres jener Hand kalt, dieser warm.

Ein sicheres Urteil über den Wärmezustand eines Körpers können wir uns verschaffen durch Benutzung der Thatsache, dafs jede Änderung der Temperatur eines Körpers von einer Änderung seines Rauminhalts begleitet ist. Werden zwei ungleich warme Körper miteinander in Berührung gebracht, so kühlt sich der wärmere ab und der kältere erwärmt sich, bis beide gleiche Temperatur besitzen, was man daran erkennt, dafs von nun an weder der eine noch der andere sein Volumen ändert. Dabei ist die Geschwindigkeit der Temperaturänderung dem Temperaturunterschied der sich berührenden Körper nahezu proportional. Die meisten Körper dehnen sich bei der Erwärmung aus. Pafst z. B. eine Metallkugel ganz genau in einen Metallring, so dafs sie eben noch hindurchgeschoben werden kann, so geht sie nicht mehr hindurch, wenn man sie erwärmt hat. Alkohol in einer an einem Ende kugelig erweiterten Glasröhre steigt in der Röhre beim Erwärmen. Ist die Glaskugel mit Luft gefüllt und bringt man in die horizontal gebogene Röhre einen Quecksilbertropfen, welcher die innere Luft von der äufseren absperrt, so dehnt sich beim Erwärmen der Kugel die Luft in ihr aus und schiebt den Tropfen vor. Einrichtungen letzterer Art wurden bereits von Galilei (1592) und Drebbel (1621) als Thermoskope zum Erkennen von Temperaturänderungen benutzt. Jedes einzelne derartige Instrument macht zwar bei derselben Temperatur immer dieselbe Angabe, verschiedene Exemplare sind aber untereinander nicht vergleichbar.

99. **Thermometer** sind Instrumente, welche den Wärmezustand eines mit ihnen in Berührung befindlichen Körpers unter sich übereinstimmend angeben und dessen Temperatur nach einer vereinbarten Skala zu messen gestatten.

Um ein Quecksilberthermometer zu verfertigen, wird an eine enge Glasröhre von überall gleicher Weite ein kugeliges oder cylindrisches Gefäſs angeblasen und das Gefäſs nebst einem Teil der Röhre mit reinem Quecksilber gefüllt. Durch Erwärmen läſst man das Quecksilber sich ausdehnen, bis es die ganze Röhre erfüllt und die Luft aus derselben vertrieben hat; wenn es gerade im Begriff ist, aus dem offenen Röhrenende herauszutreten, schmilzt man dieses zu. Die Gegenwart von Luft in der Röhre würde zwar die Ausdehnung des Quecksilbers nicht hindern; vermöge ihres Sauerstoffgehaltes könnte aber das Quecksilber teilweise oxydirt und dadurch verunreinigt werden; auch könnten Luftbläschen in den Quecksilberfaden gelangen und das Instrument unbrauchbar machen.

Umgibt man nun das Instrument mit schmelzendem Eis oder Schnee, so bemerkt man, daſs das Quecksilber sich bald auf einen bestimmten Punkt einstellt und dort feststehen bleibt, wie auch das Schmelzen des Eises durch äuſsere Wärmezufuhr fortschreiten mag. Diesen Punkt merkt man auf der Röhre an; er heiſst der Gefrierpunkt oder Eispunkt und entspricht der unveränderlichen Temperatur, bei welcher das Eis bei Wärmezufuhr schmilzt oder das Wasser bei Wärmeentziehung gefriert. Einen zweiten festen Punkt erhält man, wenn man das Instrument von den Dämpfen des siedenden Wassers umspülen läſst; das Quecksilber steigt, bleibt aber endlich an einem bestimmten Punkt stehen. Das dieser Temperatur entsprechende Ende des Quecksilberfadens wird ebenfalls markirt und Siedepunkt genannt. Der so gefundene Siedepunkt ist jedoch nur dann richtig, wenn seine Bestimmung bei 760 mm Barometerstand vorgenommen wurde; herrscht ein anderer Luftdruck, so wird eine kleine Verbesserung nötig. Der Raum zwischen diesen beiden festen Punkten heiſst der Fundamentalabstand; wie ungleich seine Länge bei verschiedenen Thermometern auch sein mag, so hat er doch bei allen dieselbe Beziehung zu den zu messenden Temperaturen, und damit ist die Vergleichbarkeit der Thermometerangaben, in welcher Weise die weitere Unterabteilung auch bewirkt werden mag, für alle Fälle gesichert. Nach Celsius (1742) wird der Abstand zwischen Gefrierpunkt und Siedepunkt in 100 gleiche Teile oder Grade ($^0$) geteilt (Centesimalskala), und solche Teile werden auch über dem Siedepunkt und unter dem Gefrierpunkt aufgetragen, soweit die Röhre reicht. An den Gefrierpunkt schreibt man 0 (Null), an den Siedepunkt 100 (nach Strömer; Celsius selbst bezifferte umgekehrt). Die Grade über Null werden nach aufwärts (positiv) gezählt und mit dem Zeichen + oder ohne Zeichen, die Grade unter Null werden nach abwärts (negativ) und mit dem Zeichen — angegeben. **Réaumur** (1730) teilte den Fundamentalabstand in 80 Grade; der Gefrierpunkt ist

ebenfalls mit 0, der Siedepunkt mit 80 bezeichnet. Beim Fahrenheitschen (1724) Thermometer steht am Gefrierpunkt die Zahl 32, am Siedepunkt 212; ihr Abstand ist sonach in 180 gleiche Teile geteilt. Fahrenheit glaubte nämlich in der tiefen Temperatur des Winters von 1709 den Punkt der Abwesenheit aller Wärme oder den „absoluten Nullpunkt“ gefunden zu haben; er stellte diese Temperatur auch künstlich her durch eine Mischung von Eis, Wasser und Salmiak und nahm sie als Nullpunkt seiner Skala an. Als zweiten festen Punkt wählte er die Temperatur des schmelzenden Eises und bezeichnete diesen Punkt mit 32; endlich benutzte er noch einen dritten festen Punkt, nämlich die Temperatur des menschlichen Körpers und bezeichnete diesen mit 96. Die Fahrenheitsche (*F.*) Skala ist in England und Nordamerika gebräuchlich, in Deutschland wird im täglichen Leben noch häufig die Skala von Réaumur (*R.*), in Frankreich die Centesimalskala von Celsius (*C.*) angewendet. Bei wissenschaftlichen Untersuchungen bedient man sich gegenwärtig allgemein des 100 teiligen Thermometers. Es ist übrigens nicht

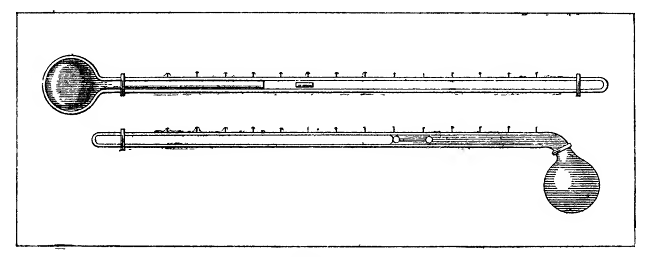


Fig. 96
Rutherfords Thermometrograph.

schwierig, die nach einer dieser drei Skalen gemachten Angaben in die der beiden andern umzurechnen. Es sind nämlich 100° C. = 80° R. = 180° F. Um z. B. Réaumursche Grade in Celsiussche zu verwandeln, multiplizirt man mit 10 und dividirt sodann durch 8; Celsiussche Grade werden in Réaumursche umgesetzt durch Multiplikation mit 8 und nachherige Division mit 10. Um Fahrenheitsche Grade in Celsiussche oder Réaumursche zu verwandeln, mufs man zuerst, um die über dem Gefrierpunkt liegenden Grade zu finden, 32 abziehen und dann den Rest mit $^5/_9$ oder beziehungsweise $^4/_9$ multipliziren. Aufser Quecksilber wird zum Füllen der Thermometer auch Weingeist verwendet; wegen seiner gleichmäfsigeren Ausdehnung (vgl. 105) verdient aber das flüssige Metall den Vorzug. Dagegen kann das Weingeistthermometer noch gebraucht werden bei den tiefen Temperaturen, bei welchen das Quecksilberthermometer wegen Erstarrung seines Inhaltes (das Quecksilber gefriert bei —38,8° C.) den Dienst versagt. Die Graduirung geschieht durch Vergleichung mit einem Quecksilberthermometer.

Das Quecksilberthermometer wird auch unbrauchbar, wenn man sich der Temperatur nähert, bei welcher das Quecksilber zu sieden beginnt (357°). Verhindert man aber das Sieden durch Gegenwart eines komprimirten Gases (Stickstoff oder Kohlensäure) im oberen Teil der Röhre, so bleibt das Instrument auch bei höheren Temperaturen (bis 550°) noch brauchbar.

Ein Weingeistthermometer kommt bei dem *Maximum- und Minimumthermometer* (Thermometrograph) von Rutherford (1794) (Fig. 96) zur Anwendung, welches die innerhalb eines beliebigen Zeitraumes, z. B. innerhalb 24 Stunden, eingetretene *höchste* und *tiefste* Temperatur durch einmalige Ablesung angibt. Auf ein- und derselben Platte sind wagrecht in entgegengesetzter Lage ein Quecksilber- und ein Weingeistthermometer befestigt. Das erstere zeigt die höchste stattgehabte Temperatur an, indem das Quecksilber beim Vorrücken einen kleinen Eisenstift vor sich herschiebt, beim Zurückweichen aber liegen läſst. Das zweite gibt die tiefste Temperatur an, indem der Weingeist ein in ihm befindliches Glasstäbchen durch die Oberflächenspannung des Meniscus beim Zurückweichen mit sich nimmt, beim Vorrücken dagegen liegen läſst. Das Instrument wird zum Gebrauch hergerichtet, indem man die Platte so neigt, daſs die Stifte mit den Flüssigkeitsoberflächen in Berührung kommen, und dann wieder wagrecht stellt. Das Sixsche Maximum- und Minimumthermometer (1782) (Fig. 97) besteht aus einer zweischenklig gebogenen Glasröhre $nop$, deren unterer gebogener Teil Quecksilber enthält. Das Gefäſs $d$ und der linke Schenkel sind bis auf das Quecksilber mit Amylalkohol, der als thermometrische Flüssigkeit wirkt, gefüllt; im rechten Schenkel, der mit dem luftleeren Gefäſs $p$ endigt, befindet sich über dem Quecksilber bis $q$ ebenfalls Amylalkohol. Jeder Schenkel der Röhre enthält in seinem mit Alkohol

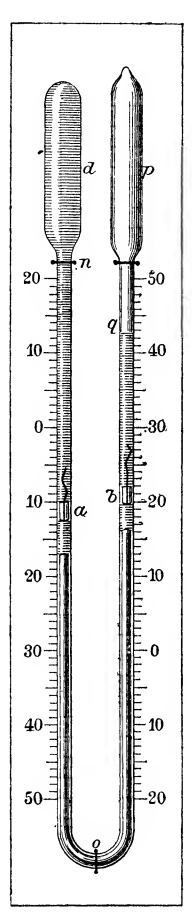
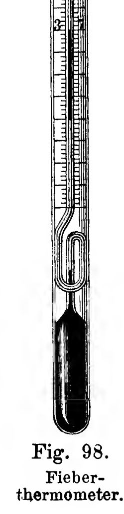


Fig. 97.
Sixsches Maximum- und Minimumthermometer.


Fig. 98.
Fieber-thermometer.

gefüllten Teil einen Stahlstift *a* und *b*, von denen der letztere bei steigender Temperatur, der erstere bei fallender Temperatur durch Vermittelung des Quecksilbers hinaufgeschoben und bei dessen Rückgang stehen gelassen wird, weil beide Stahlstifte nur mit einiger Reibung in der Röhre verschiebbar und zu diesem Zweck, wie in der Figur zu sehen, manchmal mit federnden Glasschwänzen versehen sind. Der Stift *a* gibt also die tiefste, der Stift *b* die höchste Temperatur seit der letzten Einstellung an. Die Einstellung wird durch einen kleinen, von aufsen an die Röhre gehaltenen Magnet bewirkt, durch welchen man die Stifte wieder bis zu den Quecksilberkuppen herabzieht. Zur Messung der menschlichen Blutwärme gebrauchen die Ärzte ein kleines Maximumthermometer, das sogenannte Fieberthermometer (Fig. 98, natürliche Gröfse), von dessen Quecksilbersäule das obere Stück durch eine ganz kleine Luftblase von dem übrigen Quecksilber abgetrennt ist. Beim Steigen wird der abgetrennte Faden vorgeschoben und bleibt bei der Abkühlung an der erreichten Stelle stehen. Bei einer anderen Form dieser Thermometer hat die Röhre unterhalb der Skala eine Verengerung. Die Kraft der Ausdehnung drückt das Quecksilber über diese Einschnürung hinüber in das Rohr hinein. Bei der Abkühlung aber reifst das Quecksilber an der verengten Stelle ab und der vorgeschobene Quecksilberfaden bleibt liegen. Durch Schwingen des Thermometers mufs vor jeder neuen

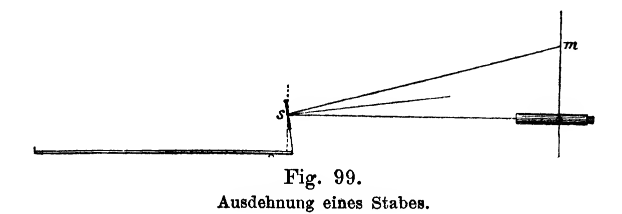



Fig. 99.
**Ausdehnung eines Stabes.**

Beobachtung der abgetrennte Faden wieder bis zum übrigen Quecksilber zurückgeführt werden. Beim Gebrauch steckt man das Gefäfs des Thermometers in eine Körperhöhle des Kranken, z. B. unter die Zunge, und wartet mindestens sechs Minuten bis zur Ablesung. Bei einem gesunden Menschen mufs die Temperatur 37,2° C. betragen. Die Einteilung gestattet, Zehntelgrade abzulesen, und braucht nur im Bereich der vorkommenden Bluttemperaturen ausgeführt zu sein.

Das durch Einteilung des Fundamentalabstandes in gleiche Teile gewonnene Temperaturmafs ist zwar nur ein willkürliches; das Quecksilberthermometer ist aber gleichwohl zur genaueren Untersuchung der Wärmeerscheinungen vom höchsten Werte und ganz unentbehrlich.

100. **Die Ausdehnung der festen Körper** oder ihre Raumvergröfserung beim Erwärmen ist so gering, dafs es besonderer Veranstaltungen bedarf, um sie augenfällig und der Messung zugänglich zu machen.

Eine wagrecht in einem Blechtrog liegende Metallstange sei mit ihrem einen Ende gegen ein festes Widerlager gestemmt, mit ihrem anderen Ende drücke sie auf den einen Arm eines Hebels, der an seiner Drehungsachse einen kleinen Spiegel *s* trägt (Fig. 99, von oben gesehen). Auf diesen Spiegel lasse man einen Lichtstrahl fallen, welcher, von dem Spiegel zurückgeworfen, auf einem in einiger Entfernung aufgestellten Maſsstab einen hellen Lichtreflex erzeugt. Erwärmt man nun die Stange, so dreht sich der Spiegel und man erkennt an der Wanderung des Lichtfleckes, daſs die Stange sich ausdehnt. Hat man den Blechtrog anfangs mit schmelzendem Eis oder Schnee, sodann mit siedendem Wasser gefüllt, so kann man von der an dem Maſsstab abzulesenden Strecke, welche der Lichtfleck durchläuft, mit Rücksicht auf die bekannte Länge des Hebelarmes und die Entfernung des Spiegels vom Maſsstab auf die Verlängerung schlieſsen, welche der Stab bei der Erwärmung vom Gefrierpunkt bis zum Siedepunkt des Wassers oder von 0—100$^0$ des 100 teiligen Thermometers erlitten hat. Bei genaueren Beobachtungen richtet man ein Fernrohr gegen den Spiegel, durch welches man das Spiegelbild des horizontal über dem Fernrohr angebrachten Maſsstabes, und zwar anfangs in der Mitte des Gesichtsfeldes (am Fadenkreuz) den Nullpunkt *o*, in der Endstellung den seitlich gelegenen Teilstrich *m* erblickt.

Durch dieses oder ein ähnliches Verfahren hat man gefunden, daſs ein aus einem der nachgenannten Stoffe verfertigter Stab von 1 m oder 1000 mm Länge bei der Erwärmung von 0$^0$ auf 100$^0$ sich um die beigefügte Anzahl von Millimetern verlängert:

| | | | |
|---|---|---|---|
| Glas | 0,8 mm | Neusilber | 1,8 mm |
| Platin | 0,9 „ | Messing | 1,9 „ |
| Stahl | 1,1 „ | Silber | 1,9 „ |
| Eisen | 1,2 „ | Zinn | 2,3 „ |
| Gold | 1,4 „ | Blei | 2,8 „ |
| Kupfer | 1,7 „ | Zink | 2,9 „ |

Nimmt man nun an, was auch sehr nahe zutrifft, daſs die Ausdehnung zwischen 0$^0$ und 100$^0$ gleichmäſsig erfolge, d. h. für gleiche Erhöhungen der nach dem Quecksilberthermometer definirten Temperatur gleichviel betrage, so findet man die Verlängerung, welche ein Körper bei der Erwärmung um 1$^0$ erfährt, gleich dem 100. Teil der obigen Zahlen; ein Zinkstab z. B. von 1 m Länge dehnt sich, wenn man ihn um 1$^0$ erwärmt, um 0,03 mm aus, oder, was dasselbe ist, um 0,00003 m, d. h. um $^3/_{100\,000}$ seiner ursprünglichen Länge. Diese Zahl, welche ausdrückt, um den wievielten Teil seiner Länge bei 0$^0$ ein Körper bei der Erwärmung um 1$^0$ sich ausdehnt, nennt man seinen Längenausdehnungs-Koëfficienten.

Bezeichnet man mit $\alpha$ den Ausdehnungskoëfficienten, so nimmt jede Längeneinheit des Körpers bei der Erwärmung von 0 auf $t^0$

um $\alpha t$ zu und wird $1 + \alpha t$. War $l_0$ die Länge des Körpers bei $0^0$, so ist demnach seine Länge $l_t$ bei $t^0$:

$$l_t = l_0 \ (1 + \alpha t).$$

Von der Verschiedenheit der Ausdehnung verschiedener fester Körper macht man manche nützliche Anwendung. Da die Schwingungsdauer eines Pendels bei Verlängerung desselben sich vergröfsert, so mufs eine mit gewöhnlichem Pendel versehene Uhr bei hoher Temperatur zu langsam, bei niedriger Temperatur zu schnell gehen. Bei dem Rostpendel (Kompensationspendel, Fig. 100) wird diese den gleichmäfsigen Gang der Uhr störende Einwirkung der Wärme ausgeglichen („kompensirt"), indem die kürzeren, aber stärker sich ausdehnenden Zinkstangen $z\,z$ die Pendellinse ebensoweit nach oben schieben, wie sie durch die längeren, aber weniger ausdehnungsfähigen Eisenstangen $e\,e\,e$ nach abwärts geschoben wird. Bei Taschenuhren und Chronometern wird der Gang der Uhr durch die Torsionsschwingungen einer Spiralfeder regulirt, deren Schwingungsdauer sich mit der Erwärmung ändert, weil sich bei der Ausdehnung der schwingenden Teile der Abstand der Massen von der Drehungsachse und damit das Trägheitsmoment (39) vergröfsert. Hier wird die Kompensation durch zwei halbkreisförmige Streifen bewirkt, die aus zwei verschiedenen Metallen zusammengelötet und mit dem einen Ende am Balancier der Unruhe befestigt sind, während die freien Ende kleine Massen tragen (Fig. 101). Das stärker sich ausdehnende der beiden Metalle dieser Streifen liegt auf der Aussenseite des Bogens. Infolgedessen krümmt sich bei Temperatursteigerung der Bogen stärker, die Massen an seinen Enden nähern sich der Achse und gleichen dadurch den Einflufs der Ausdehnung des Ganzen auf das Trägheitsmoment aus. Derartige Streifen werden ferner zur Herstellung von Metallthermometern benutzt. Bei dem Maximum- und Minimumthermometer von Hermann und Pfister (Fig. 102) ist der spiralförmig gewundene, aufsen aus Stahl, innen aus Messing bestehende Streifen $s\,s$ mit seinem inneren Ende an einen festen Metallzapfen angeschraubt, während das äufsere Ende frei ist. Beim Zunehmen der Temperatur dehnt sich das Messing stärker aus als der Stahl, die Spirale öffnet sich etwas, ihr freies Ende geht nach links und schiebt den leicht beweglichen Zeiger $c\,d$ mittels des Stiftes $p$ vor sich her; beim Erkalten schliefst sich die Spirale wieder mehr, ihr freies Ende bewegt sich nach rechts, läfst den Zeiger $c\,d$ bei dem höchsten erreichten Wärmegrad stehen und schiebt nun den Zeiger $f\,g$ mittels des Stiftes $q$ nach rechts, wo derselbe, wenn die

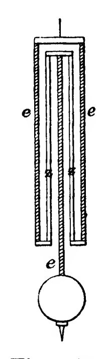
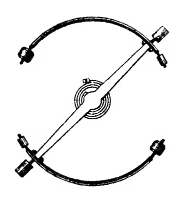


Fig. 100. Rostpendel.


Fig. 101. Compensirter Balancier eines Chronometers.

Temperatur wieder steigt, stehen bleibt und die niedrigste stattgehabte Temperatur anzeigt. Die Einteilung der bogenförmigen Skala wird durch Vergleichung mit einem Quecksilberthermometer bewirkt. Das Metallthermometer von Breguet (Fig. 103), unter allen das empfindlichste, besteht aus einem dünnen und schmalen schraubenförmig gewundenen Metallband *A B*, welches aus Platin, Gold und Silber zusammengesetzt ist; die drei Metalle, das Gold in der Mitte zwischen dem weniger ausdehnbaren Platin und dem stärker ausdehnbaren Silber, sind durch Auswalzen zu einem sehr

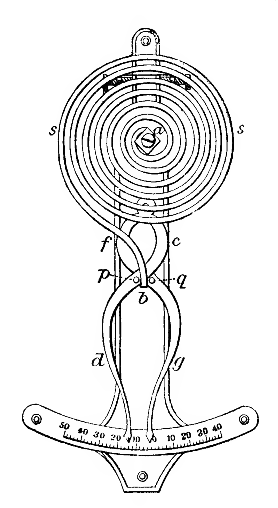



Fig. 102.
Metall-Maximum- und Minimum-thermometer.

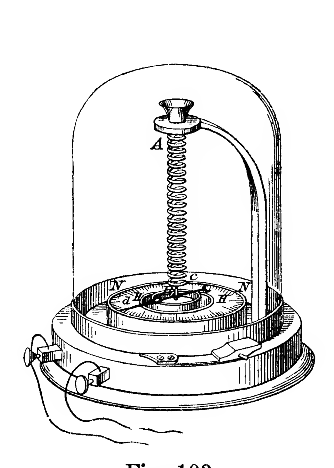



Fig. 103.
Breguets Metallthermometer.

dünnen Band vereinigt. Das untere Ende des schraubenförmigen Bandes trägt einen Zeiger *c d*, der über einer Kreisteilung *N N* schwebt.

Die Ausdehnungskoëfficienten von Legirungen können kleiner sein als diejenigen ihrer Bestandteile. Am auffälligsten ist dies beim Nickelstahl. Guillaume hat gefunden, dafs eine Legirung von 36 Prozent Nickel und 64 Prozent Stahl einen Ausdehnungskoëfficienten hat, der nur den zehnten Teil von demjenigen des Platins beträgt. Die Anwendung dieses Materials für die Darstellung von Mafsstäben, für die Compensation der Unruhe in Chronometern u. a. gewährt bedeutende Vorteile.

Die Ausdehnung der festen Körper beim Erwärmen und ihre Zusammenziehung bei der Abkühlung erfolgen mit grofser Gewalt. Bei der Herstellung eiserner Brücken, bei der Schienenlegung etc. mufs man daher den einzelnen Stücken den zu ihrer Ausdehnung nötigen Spielraum lassen, damit sie nicht durch die Kraft, mit welcher sie sich ausdehnen, verkrümmt oder zerdrückt werden. Der Schmied legt den eisernen Radreif in glühendem Zustand lose um das Rad;

nach der Erkaltung hält alsdann der enger gewordene Reif das Rad so fest zusammen, wie es auf andere Weise kaum erreichbar wäre.

Bei festen Körpern, aus welchen sich Stäbe verfertigen lassen, war es am natürlichsten, ihre Längenausdehnung zu ermitteln; da sie sich in demselben Verhältnis auch nach der Breite und Dicke ausdehnen, so kennt man hiermit auch die Vergröfserung ihres Rauminhalts (Volumens), oder ihre körperliche Ausdehnung, und zwar beträgt der körperliche oder kubische Ausdehnungskoëfficient, d. h. die Zahl, welche angibt, um den wievielten Teil seines Rauminhaltes bei $0^0$ ein Körper sich ausdehnt bei der Erwärmung um $1^0$, sehr nahe das Dreifache des Längenausdehnungskoëfficienten.

Ist nämlich $l_t = l_0 (1 + \alpha t)$ die Kantenlänge eines Würfels bei $t^0$, während sie bei $0^0$ $l_0$ betrug, so ist das Volumen $v_t$ des Würfels bei $t^0$:

$$v_t = l_t^3 = l_0^3 (1 + \alpha t)^3 = v_0 (1 + \alpha t)^3 = v_0 (1 + 3 \alpha t + 3 \alpha^2 t^2 + \alpha^3 t^3).$$

Wegen der Kleinheit von $\alpha t$ können die beiden letzten Glieder, welche noch weit kleiner sind, praktisch aufser acht gelassen werden, und man kann mit grofser Annäherung setzen:

$$v_t = v_0 (1 + 3 \alpha t) = v_0 (1 + \beta t),$$

wo nun $\beta = 3 \alpha$ der räumliche oder Volumenausdehnungs-Koëfficient ist.

Da das spezifische Gewicht dem Volumen umgekehrt proportional ist, so hat man, wenn die spezifischen Gewichte eines Körpers bei $0^0$ und bei $t^0$ beziehungsweise mit $s_0$ und $s_t$ und sein Volumenausdehnungs-Koëfficient mit $\beta$ bezeichnet werden:

$$s_t : s_0 = v_0 : v_0 (1 + \beta t)$$

oder

$$s_t = \frac{s_0}{1 + \beta t} = s_0 (1 - \beta t + \beta^2 t^2 - \beta^3 t^3 + \dots),$$

oder, wenn man von den sehr kleinen Gliedern $\beta^2 t^2$, $\beta^3 t^3$ u. s. w. absieht, mit hinreichender Genauigkeit

$$s_t = s_0 (1 - \beta t).$$

101. **Ausdehnung flüssiger Körper.** Bei flüssigen Körpern kommt überhaupt nur die Volumenausdehnung in Betracht. Um dieselbe augenfällig zu machen und sie zugleich ihrer Gröfse nach zu bestimmen, kann man sich eines Glaskolbens bedienen, dessen Hals an einer Stelle verengt und hier mit einer Marke $a$ versehen ist (Dilatometer, Fig. 104). War das Gefäfs, mit schmelzendem Eis umgeben, also bei $0^0$, z. B. mit Alkohol bis zur Marke gefüllt worden, so sieht man die Flüssigkeit bald über die Marke $a$ in den darüber befindlichen trichterförmigen Teil des Halses steigen, wenn man das dem Eise entnommene Gefäfs der gewöhnlichen Zimmertemperatur aussetzt. Wägt man das Gefäfs, dessen Gewicht im leeren Zustand man kennt, samt seinem ursprünglichen Inhalt, sodann nochmals, nachdem man die über die Marke getretene Flüssigkeit entfernt hat, so gibt das Verhältnis der Gewichte des ausgetretenen zu dem Gewichte des noch zurückgebliebenen Teiles der

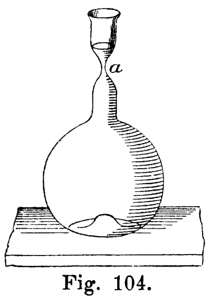


Fig. 104. Dilatometer.

Flüssigkeit deren Ausdehnung, d. h. den Bruchteil ihres ursprünglichen Volumens, um welchen sie sich zwischen den gewählten Temperaturgrenzen ausgedehnt hat. Die so gefundene Zahl gibt aber nur die scheinbare oder relative Ausdehnung der Flüssigkeit in Bezug auf Glas an; der Hohlraum des Glasgefäfses dehnt sich nämlich bei der Erwärmung ebenfalls aus, gerade so, als ob er ein massiver Glaskörper wäre. Man mufs also, um die wahre oder absolute Ausdehnung der Flüssigkeit allein zu erhalten, zu der gefundenen scheinbaren Ausdehnung noch diejenige des Gefäfses hinzuzählen, welche sich, wenn der kubische Ausdehnungskoëfficient des Glases (für gewöhnliches Glas ungefähr 0,000025) bekannt ist, leicht berechnen läfst.

Da verschiedene Glassorten sich verschieden stark ausdehnen, so genügt es bei sehr genauen Bestimmungen nicht, den aus der Längenausdehnung von Glasstäben abgeleiteten Ausdehnungskoëfficienten anzuwenden, sondern es mufs für jedes Dilatometer die Ausdehnung besonders ermittelt werden. Es ist dies leicht ausführbar, wenn die absolute Ausdehnung einer Flüssigkeit genau bekannt ist. Dulong und Petit haben daher die absolute Ausdehnung des Quecksilbers direkt bestimmt (1818). Das flüssige Metall befand sich in zwei unten durch ein enges Rohr verbundenen weiteren Glasröhren, deren eine auf $0^0$ abgekühlt, die andere auf $100^0$ erhitzt wurde. Aus den mittels des Kathetometers (das zu diesem Zwecke erfunden wurde) gemessenen Höhen der beiden Quecksilbersäulen ergab sich, unabhängig von der Ausdehnung der Glashülle, das Verhältnis der spezifischen Gewichte (und demnach auch der Volumina) des Quecksilbers bei $0^0$ und bei $100^0$, da ja die spezifischen Gewichte zweier Flüssigkeiten, welche sich in kommunizirenden Röhren das Gleichgewicht halten, sich umgekehrt verhalten wie ihre Höhen. Es ergab sich, dafs das Quecksilber bei der Erwärmung von $0^0$ auf $100^0$ sich um 0,0181 seines anfänglichen Volumens ausdehnt. Der Ausdehnungskoëfficient des Quecksilbers für $1^0$ C. beträgt daher 0,00018 oder $^1/_{5550}$.

Um nun die Ausdehnung eines Dilatometers zu finden, ermittelt man durch dasselbe in der vorhin angegebenen Weise die scheinbare Ausdehnung des Quecksilbers zwischen bekannten Temperaturgrenzen; diese abgezogen von der bekannten absoluten Ausdehnung des Quecksilbers gibt die Ausdehnung des Glases, welche, wenn man das Instrument zur Untersuchung anderer Flüssigkeiten anwendet, jedesmal zu der beobachteten scheinbaren Ausdehnung hinzugezählt werden mufs, um ihre wahre Ausdehnung zu erhalten. So ergab sich für die folgenden Flüssigkeiten die Ausdehnung

| | | |
|---|---|---|
| von $0^0$ bis $100^0$ | Wasser . . . . . . . . | 0,043 |
| | Olivenöl . . . . . . . | 0,080 |
| | Petroleum . . . . . . . | 0,100 |
| „ $0^0$ „ $80^0$ | Alkohol. . . . . . . . | 0,097 |
| „ $0^0$ „ $33^0$ | Äther . . . . . . . . | 0,054 |

Die meisten Flüssigkeiten dehnen sich nicht proportional der Temperatur aus (d. h. ihre Ausdehnung hält nicht gleichen Schritt mit der des Quecksilbers), sondern bei höheren Temperaturen schneller als bei niedrigen, oder, was dasselbe heifst, ihr Ausdehnungskoëfficient bleibt sich nicht gleich, sondern ändert sich mit der Temperatur. An dem Weingeistthermometer, das durch Vergleichung mit einem Quecksilberthermometer graduirt wird, rücken daher die Teilstriche nach oben hin immer weiter auseinander.

Die Ausdehnung der Flüssigkeiten vollzieht sich ebenfalls mit grofser Gewalt; beim Füllen eines Fasses mit Öl oder Petroleum läfst man daher noch einen kleinen mit Luft erfüllten Spielraum übrig, weil sonst das Fafs bei höherer Temperatur Gefahr liefe, zersprengt zu werden.

Ein Dilatometer kann umgekehrt als Gewichtsthermometer zu Temperaturbestimmungen gebraucht werden. Das Instrument (zu diesem Zweck am besten ein kleines Glasgefäfs mit zur Spitze ausgezogenem Hals) wird bei $0^0$ mit Quecksilber gefüllt und gewogen, sodann, nachdem es der zu bestimmenden Temperatur ausgesetzt war und ein Teil des Quecksilbers ausgeflossen ist, abermals gewogen. Das Verhältnis der ausgeflossenen zur zurückgebliebenen Quecksilbermenge gibt die scheinbare Ausdehnung an, woraus nun, wenn der scheinbare Ausdehnungskoëfficient des Quecksilbers im Glase vorher ermittelt ist (0,000156 im gewöhnlichen Glas), die erreichte Temperatur berechnet wird.

Wog der Inhalt des Instrumentes $P$ bei $0^0$, $P'$ bei $t^0$, ist $v_0$ der Rauminhalt bei $0^0$, $\beta$ der Ausdehnungskoëfficient des Quecksilbers, $\gamma$ derjenige des Glases, ferner $s_0$ das spezifische Gewicht des Quecksilbers bei $0^0$, so ist bei $t^0$

das Volumen des Gefäfses $v_0(1+\gamma t)$,

das spezifische Gewicht des Quecksilbers $\frac{s_0}{1+\beta t}$,

und es mufs

$$P = v_0 s_0, \qquad P' = v_0 s_0 \frac{1+\gamma t}{1+\beta t}$$

sein, woraus sich ergibt

$$\frac{P-P'}{P'} = \frac{(\beta-\gamma)t}{1+\gamma t},$$

oder, weil $\gamma$ sehr klein ist, mit hinreichender Genauigkeit

$$\frac{P-P'}{P'} = (\beta-\gamma)t,$$

wo $\beta-\gamma$ der scheinbare Ausdehnungskoëfficient des Quecksilbers ist.

102. **Anomalie des Wassers.** Ein besonders eigentümliches Verhalten zeigt das Wasser. Ein Glaskolben, durch dessen festschliefsenden Kork eine oben und unten offene Glasröhre und ein Thermometer gesteckt ist (Fig. 105), werde bis in die Röhre hinein mit Wasser von $0^0$ (durch Umgeben mit schmelzendem Eis) gefüllt; aufserdem ist in den Kolben, dessen Fassungsraum vorher bestimmt wurde, soviel Quecksilber gebracht, dafs die Ausdehnung der Glas-

hülle durch diejenige des Quecksilbers gerade aufgehoben wird, und sonach das den übrig gebliebenen Raum erfüllende Wasser seine absolute Volumenänderung zeigen mufs. Erwärmt sich nun das aus dem Eis genommene Gefäfs langsam durch die wärmere Umgebung, so sieht man die Wassersäule in der Röhre zunächst sinken, bis das Thermometer 4° zeigt; dann steigt das Wasser wieder allmählich bis zum ursprünglich bei 0° innegehabten Stand, den es bei ungefähr 8° erreicht, und steigt nun bei fortgesetzter Erwärmung immer rascher. Es ergibt sich aus diesem Versuch, dafs sich das Wasser bei der Erwärmung von 0—4° C. zusammenzieht und dann erst bei weiterer Erwärmung sich ausdehnt; eine Wassermenge nimmt also bei 4° einen kleineren Raum ein als bei jeder anderen Temperatur: das Wasser hat bei 4° seine gröfste Dichte, es ist bei dieser Temperatur spezifisch schwerer als bei jeder anderen. 1 Liter (oder 1000 ccm) Wasser von 4° dehnt sich aus beim Erwärmen

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| auf | 6° | um | 0,03 | ccm |
| „ | 10° | „ | 0,3 | „ |
| „ | 30° | „ | 4 | „ |
| „ | 60° | „ | 17 | „ |
| „ | 100° | „ | 43 | „ |

Diesem merkwürdigen Verhalten des Wassers ist es zu verdanken, dafs unsere gröfseren Seen niemals bis auf den Grund gefrieren können. Im Winter erkalten zuerst die oberen Wasserschichten durch Ausstrahlung und Berührung mit der kalten Luft; solange die Temperatur der gröfsten Dichte noch nicht erreicht ist, sinkt das schwerere kalte Wasser zu Boden und wird durch aufsteigendes wärmeres Wasser ersetzt. Dieses Spiel dauert fort, bis endlich die ganze Wassermasse die Temperatur 4° besitzt. Erkalten jetzt die oberflächlichen Schichten noch tiefer, so kann ihr kälteres Wasser, weil es leichter ist als das von 4°, nicht mehr herabsinken; es behauptet sich oben, und hier beginnt auch, wenn die Oberfläche die Temperatur des Gefrierpunkts erreicht hat, bei weiterer Wärmeentziehung die Eisbildung; da das Eis ebenfalls nicht untersinken kann, so überzieht sich die Wasserfläche mit einer schützenden Eisdecke, welche das Erkalten der unteren Schichten verzögert und daher nur allmählich an Dicke zunimmt. In der Tiefe aber behält das Wasser jahraus jahrein, auch wenn der See oben zugefroren ist, die Temperatur von 4° und ermöglicht dadurch das Fortbestehen des Lebens der Wassertiere.

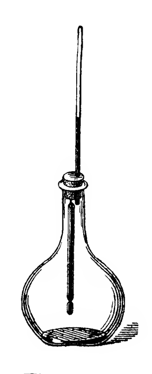


Fig. 105.
Wasserthermometer.

Man kann diesen Vorgang im kleinen nachahmen; in ein hohes und weites cylindrisches Glasgefäfs, in welchem oben und unten ein Thermometer befestigt ist, wird Wasser von gewöhnlicher Zimmertemperatur gefüllt und von oben her abgekühlt, indem man Eisstücke

hineinwirft, die ja auf dem Wasser schwimmen. Das untere Thermometer sinkt, aber nur bis 4°, und bleibt auf diesem Punkte stehen, während das obere 0° zeigt.

103. **Ausdehnung der luftförmigen Körper.** Will man die Ausdehnung der Gase messen, so mufs man berücksichtigen, dafs der Rauminhalt eines Gases nicht blofs von seiner Temperatur abhängt, sondern auch (nach dem Mariotteschen Gesetz) von dem Druck, welchem es ausgesetzt ist, und mufs daher Sorge tragen, dafs die Messung des ursprünglichen und des durch Ausdehnung vergröfserten Rauminhalts bei dem gleichen Druck vorgenommen werde. Hierzu kann man sich folgender Vorrichtung (Fig. 106) bedienen. Ein **U**-förmiges Glasrohr *ABCD* ist von einem Glasmantel umgeben, der mit Wasser von bestimmter Temperatur gefüllt, oder durch den Dampf hindurchgeleitet werden kann. Der eine Schenkel *AB* ist oben zugeschmolzen; er ist sorgfältig in ccm getheilt und enthält ein Quantum trockner Luft, die in ihm über Quecksilber abgesperrt ist. Das Quecksilber füllt den übrigen Theil dieses und den offenen Schenkel. Durch Nachgiefsen von Quecksilber in den letzteren oder durch Ablassen mittels des Hahnes *C* kann die Quecksilbermenge so regulirt werden, dafs das Quecksilber in beiden Schenkeln gleich hoch steht. Man füllt nun zunächst den Mantel mit einem Gemisch von Wasser und Eis, regulirt, nachdem die Luft im Apparat die Temperatur 0° angenommen, das Quecksilber so, dafs es in beiden Schenkeln gleich hoch steht (bei *a*), und liest an der Theilung auf dem geschlossenen Schenkel das Volumen der Luft ab. Nun läfst man Dämpfe siedenden Wassers durch den Mantel hindurchströmen. Die Luft im Apparat dehnt sich aus und drückt das Quecksilber im geschlossenen Schenkel herab, im offenen hinauf; durch Ablassen von Quecksilber mittels des Hahnes *C* bringt man es dahin, dafs das Quecksilber in beiden Schenkeln wieder gleich hoch steht (bei *d*) und liest abermals das Volumen der Luft ab. In beiden Fällen befindet sich die abgeschlossene Luftmenge unter demselben Druck, nämlich unter dem Druck der äufseren Atmosphäre. Das Volumen der Luft aber hat sich bei der Erwärmung geändert, von *Aa* bis *Ad*, oder es hat zugenommen um *ad*. War das ursprüngliche Volumen bei 0° etwa 10 ccm, so findet man, dafs es sich durch Erwärmung von 100° auf 13,7 ccm ausgedehnt, d. h. um 3,7 ccm vergröfsert hat. Genaue Messungen haben ergeben,

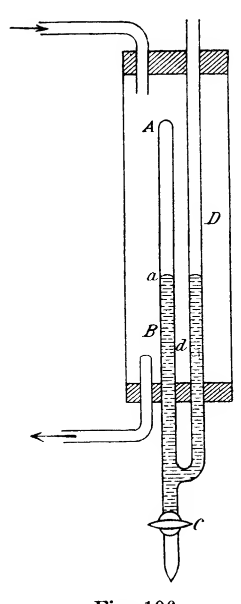


Fig. 106.
Ausdehnung der Gase.

dafs eine Luftmenge von 1000 ccm (1 l) sich bei der Erwärmung vom Gefrierpunkt bis zum Siedepunkt des Wassers um 367 ccm oder um $^{100}/_{273}$ des anfänglichen Rauminhalts ausdehnt. Führt man die gleichen Versuche mit andern Gasen aus, so findet man für alle sehr nahe die gleiche Ausdehnung. Der mittlere Ausdehnungskoëfficient ist also für alle Gase $= {}^{1}/_{273}$ oder genauer $= 0{,}00367$, und wir gelangen zu dem Gay-Lussacschen Gesetz (Charles 1787, Dalton 1801, Gay-Lussac 1802): alle Gase dehnen sich bei der Erwärmung unter gleichbleibendem Druck gleichstark aus und zwar für jeden Grad (C.) um $^{1}/_{273}$ ihres Rauminhalts bei 0°. Dieses Gesetz im Verein mit dem Mariotteschen Gesetz, welches aussagt, dafs bei gleichbleibender Temperatur der Druck einer Gasmenge im umgekehrten Verhältnis ihres Rauminhalts steht, belehrt uns in erschöpfender Weise über die Beziehungen, welche zwischen Temperatur, Druck und Rauminhalt einer Gasmenge bestehen. Insbesondere lehrt es uns noch, dafs, wenn ein Gas bei unverändertem Rauminhalt erwärmt wird, sein Druck für jeden Grad Erwärmung um $^{1}/_{273}$ des Drucks bei 0° zunimmt. Denn prefst man in der Vorrichtung, Fig. 106, nachdem sich die Luft bei 100° bis *d* ausgedehnt hat, dieselbe durch Eingiefsen von Quecksilber in den offenen Schenkel wieder auf ihren ursprünglichen Raum (bis *a*), also im Verhältnis von 137 zu 100, zusammen, so mufs nach dem Mariotteschen Gesetz ihr Druck im umgekehrten Verhältnis von 100 zu 137 wachsen; in denselben Zustand, in welchem sich die eingeschlossene Luft jetzt befindet, wäre sie aber auch versetzt worden, wenn man von vornherein bei der Erwärmung von 0° auf 100° durch Eingiefsen von Quecksilber ihre Ausdehnung verhindert hätte. Dafs eine Drucksteigerung in dem angegebenen Verhältnis in der That stattgefunden hat, erkennt man an der Höhe der Quecksilbersäule, welche jetzt in dem längeren Schenkel *D* über der Marke *a* steht; dieselbe beträgt nämlich $^{37}/_{100}$ des gleichzeitigen Barometerstands. Man sieht also, dafs der Ausdehnungskoëfficient der Gase zugleich ihr Spannungskoëfficient ist, indem er bei gleichbleibendem Rauminhalt den für jeden Wärmegrad stattfindenden Zuwachs des Drucks oder der Spannung angibt, und dafs man sonach ersteren auch durch Messung der im Schenkel *D* der Vorrichtung Fig. 106 über die Marke *a* gehobenen Quecksilbersäule hätte ermitteln können.

104. **Luftthermometer.** Nachdem die Ausdehnung der Gase ihrer Gröfse nach bekannt ist, kann man sie benutzen, um Temperaturen zu messen. Einen zu diesem Zwecke bestimmten Apparat nennt man ein Luftthermometer. Um dabei nur das abgeschlossene Luftquantum der zu messenden Temperatur auszusetzen und ferner stets dieses ganze Quantum auf der betreffenden Temperatur zu erhalten, giebt man dem Apparate die in Fig. 107 abgebildete Form (Jolly's Luftthermometer, 1874) und mifst mit ihm nicht die Volum-, sondern die Druckänderung der abgeschlossenen Luftmasse. Die

beiden gleichweiten Schenkel des Manometers sind durch einen Kautschukschlauch miteinander verbunden, und können mittels Schlitten an der vertikalen Säule, welche die auf einen Spiegelstreifen geritzte Millimeterskala trägt, verschoben werden. Hält man das Auge so, daſs das Spiegelbild der Pupille mit dem der Quecksilberkuppe zusammenfällt, so trifft die über letztere weggehende Visirlinie die Skala senkrecht, und der bei schiefem Visiren sich ergebende Ablesungsfehler (die Parallaxe) wird vermieden.

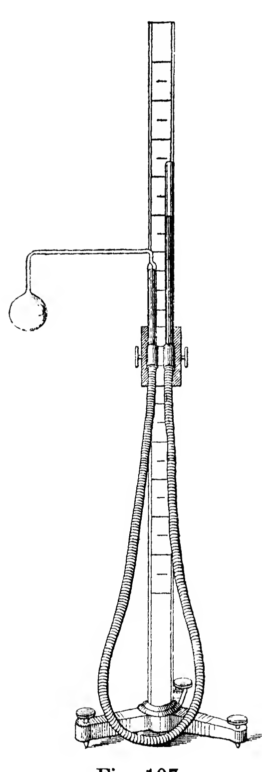


Fig. 107.
Jollys Luftthermometer.

Die Erfahrung zeigt, daſs Luft- oder überhaupt Gasthermometer genauer untereinander übereinstimmen als Quecksilberthermometer aus verschiedenen Glassorten unter sich. Die Verschiedenheit der Ausdehnung verschiedener Glassorten hat auf die Angaben der Gasthermometer einen weit geringeren Einfluſs als auf die Quecksilberthermometer, da ein Gas sich 146 mal, Quecksilber nur 7 mal stärker ausdehnt als Glas. Auſserdem ist ein Gasthermometer innerhalb viel weiterer Temperaturgrenzen brauchbar als das Quecksilberthermometer, dem durch den Erstarrungspunkt und den Siedepunkt des Quecksilbers Schranken gezogen sind. Vor allem aber deutet der Umstand, daſs alle Gase sehr nahe den gleichen Ausdehnungskoëfficienten haben, auf eine besonders einfache Beziehung zwischen Temperatur und Ausdehnung bei den Gasen hin. Man hat daher das Luft- oder besser noch das Wasserstoffthermometer als Normalthermometer gewählt, auf dessen Angaben man bei genaueren Messungen diejenigen der Quecksilberthermometer zurückführt. Übrigens stimmt das Quecksilberthermometer zwischen $0^0$ und $100^0$ sehr nahe mit dem Luftthermometer überein.

105. **Mariotte-Gay-Lussacsches Gesetz. Absolute Temperatur.** Hat eine Gasmenge bei $0^0$ und beim Drucke $p_0$ das Volumen $v_0$, so nimmt sie nach dem Gay-Lussacschen Gesetz bei $t^0$, wenn der Druck unverändert bleibt, den Raum

$$v_1 = v_0 (1 + \alpha t)$$

ein, wo $\alpha = {}^1/_{273}$ ist. Ändert man nun bei gleichbleibender Temperatur den Druck $p_0$ in $p$, so ergibt sich nach dem Mariotteschen Gesetz das neue Volumen $v$ gemäſs der Gleichung

$$pv = p_0 v_1,$$

oder

$$pv = p_0 v_0 (1 + \alpha t).$$

Diese letzte Gleichung stellt das vereinigte Mariotte-Gay-Lussacsche Gesetz dar; man nennt sie auch die Zustandsgleichung der Gase, weil sie die wechselseitige Beziehung der drei Gröſsen Druck, Volumen und Temperatur ($p$, $v$, $t$), durch welche der Zustand eines Gases bedingt ist, ausdrückt.

Bleibt $t$ unverändert, so ist auch $p_0 v_0 (1 + \alpha t)$ eine unveränderliche Gröſse (Konstante), und die allgemeine Gleichung geht über in das Mariottesche Gesetz $p v =$ Konst.

Wird das Gas bei gleichbleibendem Druck ($p = p_0$) von $0^0$ bis $t^0$ erwärmt, so erhält man das Gay-Lussacsche Gesetz

$$v = v_0 (1 + \alpha t).$$

Ändert man die Temperatur des Gases bei unverändertem Rauminhalt ($v = v_0$) von $0^0$ bis $t^0$, so geht aus der allgemeinen Gleichung hervor, daſs der Druck oder die Spannung

$$p = p_0 (1 + \alpha t)$$

für jeden Grad um $\alpha = {}^1/_{273}$ wächst oder abnimmt, und daſs jetzt, wie oben bereits gefunden wurde, der Ausdehnungs- als Spannungskoëfficient auftritt.

Unter der Annahme, daſs diese Gleichung uneingeschränkt gelte, ergibt sich aus ihr, daſs für

$$t = -\frac{1}{\alpha} = -273^0$$

die Spannung der Gase verschwindet (Amontons, 1703). Man nennt diese Temperatur den absoluten Nullpunkt, und die von ihm aus gezählte Temperatur, die sich ergibt, wenn man zu 273 noch die jeweiligen Grade $t$ der Celsiusschen Skala hinzuzählt, die absolute Temperatur

$$T = 273 + t.$$

Durch Einführung der absoluten Temperatur erreicht man manche Vereinfachungen. Das Mariotte-Gay-Lussacsche Gesetz z. B.

$$pv = p_0 v_0 \left(1 + \frac{t}{273}\right)$$

läſst sich auch so schreiben

$$p v = \frac{p_0 v_0}{273}(273 + t) = \frac{p_0 v_0}{273} . T,$$

oder, wenn man die unveränderliche Gröſse $p_0 v_0/273$ mit $R$ bezeichnet:

$$p v = R T.$$

Das Mariotte-Gay-Lussacsche Gesetz kann daher auch so ausgesprochen werden: Für alle Gase ist das Produkt aus Druck und Volumen der absoluten Temperatur proportional. Bezieht man die Werte auf Gasmassen, die den Molekulargewichten der Gase proportional sind, so hat $R$ für alle Gase den gleichen

Wert. So erhält man für ein Gramm-Molekül im Liter, wenn man $p$ in Atmosphären und $v$ in Litern rechnet (89),

$$R = \frac{22,42 \times 1}{273} = 0,0821.$$

Die Übereinstimmung zwischen den Gesetzen des osmotischen Drucks und den Gasgesetzen bewährt sich auch in Bezug auf die Änderung des osmotischen Drucks mit der Temperatur. Denn bei gleich bleibender Koncentration der Lösung nimmt der osmotische Druck proportional der Temperatur und für alle gelösten Stoffe in gleichem Verhältnis zu, und zwar um genau die gleiche Gröfse ($^1/_{273}$ für 1° C.) wie bei den Gasen (Pfeffer, 1877. Van't Hoff).

106. **Abweichungen vom Mariotte-Gay-Lussacschen Gesetz.** Das Verhalten der Gase weicht von diesem Gesetz etwas ab, wenn auch nur sehr wenig. Regnault (1847) fand, dafs Luft und Kohlensäure bei wachsendem Druck ihr Volumen etwas rascher vermindern, als das Mariottesche Gesetz verlangt, Wasserstoff dagegen weniger rasch. Auch ergab sich, dafs die Ausdehnungskoëfficienten verschiedener Gase unter sich nicht genau gleich sind, und bei einem und demselben Gase der Ausdehnungskoëfficient dem Spannungskoëfficienten nicht völlig gleich ist. Ein Gas, welches dem Mariotte-Gay-Lussacschen Gesetz genau gehorchen würde, nennt man ein ideales oder vollkommenes Gas. Die Abweichungen der wirklichen Gase von ihrem idealen Zustande nehmen zu mit wachsendem Druck, mit steigender Temperatur aber nähern sich alle Gase dem vollkommenen Gaszustand.

Auch die den Gasgesetzen entsprechenden Gesetze des osmotischen Drucks sind nicht in aller Strenge, aber um so genauer erfüllt, je verdünnter die Lösung ist.

Die von van der Waals (1873) aufgestellte vollständigere Zustandsgleichung der Gase, welche auch den Abweichungen vom idealen Gesetz Rechnung trägt, lautet:

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT,$$

wo $a$ und $b$ kleine aus den Beobachtungen zu bestimmende Zahlenwerte sind. Für $a = 0$ und $b = 0$ geht daraus das ideale Gesetz $pv = RT$ hervor.

107. **Reduktion der Gasvolumina.** Da eine Gasmenge je nach dem Druck und der Temperatur, welchen sie ausgesetzt ist, jeden beliebigen Raum einnehmen kann, so würde es keinen Sinn haben, den Rauminhalt eines Gases zu messen, wenn man nicht gleichzeitig den Druck und die Temperatur des Gases bestimmte. Kennt man aber diese beiden Umstände, so ist es leicht, an der Hand des Mariotte-Gay-Lussacschen Gesetzes denjenigen Raum zu ermitteln, welchen die nämliche Gasmenge bei einem Druck gleich demjenigen einer Quecksilbersäule von 760 mm und bei einer Temperatur von 0° einnehmen würde; man ist nämlich übereingekommen, den Zustand eines Gases, welcher durch diesen Druck (den Normalbarometer-

stand) und durch diese Temperatur gekennzeichnet ist, als Normalzustand anzunehmen, auf welchen alle an Gasen angestellten Messungen, um sie vergleichbar zu machen, zurückgeführt werden.

Man habe z. B. eine Gasmenge in der pneumatischen Wanne über Quecksilber in einer in ccm geteilten Röhre aufgefangen, und ihr Volumen $v$ abgelesen; ihren Druck $p$ findet man, wenn man von dem gleichzeitig abgelesenen Barometerstand (mm) die Höhe der noch in der Röhre stehen gebliebenen Quecksilbersäule abzieht; die Temperatur $t$ ist die der Umgebung, welche ein in der Nähe hängendes Thermometer zeigt. Das Volumen $v_0$ im Normalzustand findet man jetzt aus der Gleichung

$$p\,v = p_0\,v_0\,(1 + a\,t),$$

in welcher alle übrigen vorkommenden Gröfsen, da $p_0 = 760$ mm zu nehmen ist, gegeben sind.

108. **Schmelzen. Schmelzpunkt. Schmelzwärme. Wärmeeinheit.** Führt man einem festen Körper fortgesetzt Wärme zu, so steigt zunächst seine Temperatur; hat dieselbe eine gewisse Höhe erreicht, so geht der Körper in den flüssigen Zustand über, er schmilzt. In der Regel erfolgt die Schmelzung bei einem für jeden Stoff ganz bestimmten Wärmegrad, welchen man den Schmelzpunkt nennt. Die Schmelzpunkte einiger Körper sind:

| | | | |
|---|---|---|---|
| Quecksilber | —39° C. | Blei | 328° C. |
| Eis | 0 „ | Zink | 418 „ |
| Benzol | 5,4 „ | Antimon | 425 „ |
| Eisessig | 16,8 „ | Silber | 968 „ |
| Talg | 43 „ | Gold | 1070 „ |
| Paraffin | 46 „ | Kupfer | 1080 „ |
| Wachs | 62 „ | Gufseisen | 1200 „ |
| Schwefel | 115 „ | Gufsstahl | 1375 „ |
| Zinn | 230 „ | Schmiedeeisen | 1600 „ |
| Wismut | 269 „ | Platin | 1775 „ |
| Cadmium | 321 „ | Iridium | 1950 „ |

Merkwürdig ist, dafs der Schmelzpunkt mancher Metallgemische (Legirungen) niedriger ist als derjenige eines jeden ihrer Bestandteile. Das Schnellot der Klempner, aus 5 Gewichtsteilen Zinn und 1 Gewichtsteil Blei bestehend, schmilzt bereits bei 195°; das Rosesche Metallgemisch, aus 2 Teilen Wismut, 1 Teil Blei und 1 Teil Zinn, schmilzt schon unterhalb der Siedehitze des Wassers bei 95°, Woods Metall, aus 1 bis 2 Teilen Cadmium, 7—8 Teilen Wismut, 2 Teilen Zinn und 4 Teilen Blei, sogar schon bei 65 bis 70°. Alle Körper sind bei genügend hoher Erhitzung schmelzbar, falls sie nicht, wie z. B. das Holz, schon vorher durch die Hitze chemisch zersetzt werden. Nur Kohle hat bisher durch die uns zur Verfügung stehenden Hilfsmittel nicht geschmolzen werden können.

So lange das Schmelzen dauert, behält der schmelzende Körper die Temperatur seines Schmelzpunktes unverändert bei. An einem kalten Wintertag stelle man ein Gefäfs voll Schnee, welcher unter den Gefrierpunkt, z. B. auf — 5° erkaltet ist, mit einem Thermometer

darin auf den warmen Ofen. Zunächst wird das Thermometer steigen und anzeigen, daſs der Schnee sich nach und nach auf —4°, —2°, —1° bis 0° erwärmt. Nun aber bleibt das Thermometer auf 0° eine Zeitlang unverändert stehen, bis der Schnee völlig zerschmolzen ist und sich in Wasser von 0° verwandelt hat. Alsdann steigt das Thermometer wieder, indem sich das entstandene Wasser erwärmt. Obgleich von dem Ofen unausgesetzt Wärme in das Gefäſs übergeht, so findet doch, während der Schnee schmilzt, keine Erwärmung statt, sondern alle während des Schmelzens zugeführte Wärme wird dazu verbraucht, den Schnee von 0° in Wasser von 0° zu verwandeln, und sie verschwindet daher sowohl für unser Gefühl als für das Thermometer. Die Wahrnehmung, daſs bei gleichmäſsiger Wärmezufuhr der Schmelzvorgang um so länger dauert, je gröſser die Masse des zu schmelzenden Körpers ist, führt zu dem Begriffe der Wärmemenge. Man nennt die Wärmemenge, welche erforderlich ist, um 1 kg eines Körpers in den flüssigen Zustand überzuführen, die Schmelzwärme des Körpers, oder auch, weil sie sich gleichsam mit dem Körper verbunden oder in der entstandenen Flüssigkeit versteckt zu haben scheint, die gebundene oder latente Wärme (Black, 1757). Um die Schmelzwärme des Eises zu bestimmen, vermischen wir rasch 1 kg trockenen Schnee von 0° mit 1 kg Wasser von 80° C.; wir erhalten, nachdem der Schnee geschmolzen ist, 2 kg Wasser von 0°. Demnach wird alle Wärme, welche 1 kg Wasser abgibt, indem es von 80° C. auf 0° erkaltet, dazu verwendet, 1 kg Schnee von 0° in 1 kg Wasser von ebenfalls 0° zu verwandeln, oder, mit anderen Worten, zur bloſsen Schmelzung von 1 kg Eis wird ebensoviel Wärme verbraucht als nötig war, um 1 kg Wasser von 0° auf 80° zu erwärmen. Die Wärmemenge, welche erfordert wird, 1 kg Wasser um 1° C. zu erwärmen, nennt man eine Wärmeeinheit oder Kalorie. Die Schmelzwärme des Eises beträgt demnach 80 Wärmeeinheiten. Genauere Untersuchungen über die Wärmeeinheit haben übrigens ergeben, daſs die Wärmemenge, welche 1 kg Wasser um 1° C. erwärmt, verschieden ist, je nachdem man die Ausgangstemperatur des Wassers wählt. Sie ist z. B. gröſser, wenn man das Wasser von 0° auf 1° erwärmt, als wenn man es von 20° auf 21° erwärmt, und zwar um mehr als 0,5 Proz. Um die hieraus entspringende Unsicherheit zu vermeiden, hat man als Wärmeeinheit diejenige Wärmemenge vorgeschlagen, welche 1 kg Wasser von 14,5 auf 15,5° C. nach dem Wasserstoffthermometer erwärmen würde.

Die Schmelzwärmen einiger Körper sind:

| | | | |
|---|---|---|---|
| Eis . . . . . . . | 80,0 | Wismut . . . . . | 12,6 |
| Phosphor . . . . | 5,0 | Zinn . . . . . . . | 14,2 |
| Schwefel . . . . | 9,4 | Silber . . . . . . . | 21,1 |
| Blei . . . . . . . | 5,3 | Zink . . . . . . . . | 28,1 |

Stellt man ein Glas Wasser, in welches ein Thermometer eingesenkt ist, bei groſser Kälte ins Freie, so sieht man das Thermometer

sinken, bis es $0^0$ erreicht hat; nun beginnt die Eisbildung, und das Thermometer bleibt jetzt längere Zeit unverändert auf $0^0$ stehen, bis seine Kugel ganz von Eis umhüllt ist. Obgleich also dem Gefäfs fortwährend durch Abgabe an die kältere Umgebung Wärme entzogen wird, sinkt doch während der Dauer des Erstarrens die Temperatur nicht, was nur dadurch möglich ist, dafs beim Festwerden des Wassers sich Wärme entwickelt, welche, indem sie in jedem Augenblick die nach aufsen abgegebene Wärmemenge ersetzt, die Temperatur $0^0$ aufrecht erhält.

Beim Erstarren wird also die beim Schmelzen gebundene Wärmemenge wieder frei. Durch die grofse Wärmemenge, welche das Wasser beim Gefrieren entbindet, wird der Eintritt der Winterkälte verzögert.

Wasser von $0^0$ gefriert, wenn man ihm Wärme entzieht, Eis von $0^0$ schmilzt, wenn man ihm Wärme zuführt; die Erstarrungstemperatur (der Gefrierpunkt) fällt also mit dem Schmelzpunkt zusammen. Unter besonderen Umständen aber, nämlich bei Vermeidung von Erschütterungen und bei Abschlufs der Luft, können Flüssigkeiten bis weit unter den Schmelzpunkt abgekühlt werden, ohne zu erstarren; man sagt alsdann, die Flüssigkeit sei unterkühlt oder überschmolzen und nennt die Erscheinung Überschmelzung oder Gefrierverzug. Stellt man ein Glas Wasser mit einer Ölschicht bedeckt und einem Thermometer darin bei starkem Frost ins Freie, so kann man das Thermometer auf $-8^0$ bis $-10^0$ sinken sehen, ohne dafs das Wasser gefriert, bei einer Erschütterung aber erstarrt plötzlich soviel Wasser, dafs die Temperatur der ganzen Masse infolge der freigewordenen Wärme rasch auf $0^0$ steigt. Höher kann die Temperatur nicht steigen, da hiermit die Bedingung zu weiterem Gefrieren aufhört.

Schmilzt man krystallisirtes unterschwefligsaures Natrium (Schmelzpunkt $48^0$) in einem Glaskölbchen, so erkaltet die Flüssigkeit bei ruhigem Stehen bis zur Zimmertemperatur ($18^0$), ohne zu erstarren. Sie erstarrt aber beim Erschüttern oder noch sicherer, wenn man einen Krystall desselben Salzes hineinwirft, und dabei steigt die Temperatur rasch auf $48^0$.

Die meisten Körper dehnen sich beim Schmelzen aus und zwar manche ganz plötzlich; der Phosphor z. B. vergröfsert beim Schmelzen seinen Rauminhalt um 3,4 Prozent. Einige Körper aber, wie Eis und Wismut, nehmen im geschmolzenen Zustand einen geringeren Raum ein als im starren; aus 1000 ccm Eis von $0^0$ erhält man durch Schmelzung nur 910 ccm Wasser von $0^0$, und beim Gefrieren von 1000 ccm Wasser findet eine plötzliche Ausdehnung um 90 ccm statt; das Eis ist daher spezifisch leichter als Wasser, und schwimmt selbst auf siedendem Wasser. Die Gewalt, mit welcher diese Ausdehnung erfolgt, ist so bedeutend, dafs mit Wasser gefüllte Flaschen, Wasserleitungsröhren, selbst dickwandige Bomben beim Gefrieren ihres Inhalts zersprengt werden.

Bei Körpern, die beim Schmelzen ihren Rauminhalt vergröfsern,

wird der Schmelzpunkt durch äufseren Druck erhöht, dagegen erniedrigt bei jenen, die im flüssigen Zustand einen kleineren Raum einnehmen. Durch einen Druck von 17 Atmosphären wird z. B. der Schmelzpunkt des Eises um $0{,}129^0$ erniedrigt, und bei ca. 13000 Atmosphären ist das Wasser bei $-18^0$ noch flüssig (Mousson, 1858). Drückt man zwei Eisstücke aneinander, so tritt an der Berührungsstelle wegen Erniedrigung des Schmelzpunktes Schmelzung ein; beim Nachlassen des Drucks gefriert aber das entstandene Schmelzwasser wieder und kittet die Eisstücke aneinander. Man nennt diesen Vorgang, welcher bei Bildung und Fortbewegung der Gletscher wesentlich einwirkt, Regelation (Faraday, 1850).

109. **Gefrieren von Lösungen.** Der Erstarrungspunkt einer Flüssigkeit wird durch Auflösen einer anderen Substanz in ihr erniedrigt. Meerwasser z. B., welches 3,5 bis 3,7 Prozent Salze gelöst enthält, erstarrt erst zwischen $-2$ und $-3^0$. Diese Gefrierpunktserniedrigungen sind bei verdünnten Lösungen der gelösten Menge proportional. Sie sind ferner für ein und dasselbe Lösungsmittel umgekehrt proportional dem Molekulargewicht der gelösten Substanz (Raoult, 1882), z. B. beträgt die Gefrierpunktserniedrigung für Wasser $18{,}5 \times \frac{m}{M}$, wenn $M$ das Molekulargewicht, $m$ die Anzahl Gramm der gelösten Substanz auf 100 g Wasser bedeutet. Mengen verschiedener Stoffe, die sich verhalten wie ihre Molekulargewichte, bringen also in demselben Lösungsmittel gleiche Gefrierpunktserniedrigungen hervor; oder äquimolekulare Lösungen haben gleiche Erstarrungspunkte. Diese Sätze werden benutzt, um mit Hilfe der Gefrierpunktserniedrigungen die Molekulargewichte gelöster Substanzen zu ermitteln. Doch gelten die angegebenen Beziehungen nur für verdünnte Lösungen indifferenter organischer Substanzen. Lösungen anorganischer Salze zeigen Abweichungen, die mit der Eigenschaft dieser Lösungen, den elektrischen Strom zu leiten, in Zusammenhang stehen (vgl. 210).

Bei dem Erstarren verdünnter Lösungen geht aber nur das Lösungsmittel in den festen Zustand über. Aus den wässerigen Salzlösungen scheidet sich beim Erstarrungspunkte reines Eis aus. Die zurückbleibende Lösung wird durch diese Ausscheidung des Lösungsmittels konzentrirter und dementsprechend sinkt ihr Erstarrungspunkt. Während also reines Wasser von $0^0$ bei Wärmeentziehung seine Temperatur so lange behält, bis alles Wasser sich in Eis von $0^0$ verwandelt hat, sinkt bei einer Lösung die Temperatur immer tiefer, je mehr von dem Lösungsmittel sich ausscheidet, bis schliefslich die übrig bleibende, ursprünglich verdünnte Lösung zu einer gesättigten Lösung geworden ist. Von diesem Augenblick an scheidet sich bei weiterer Wärmeentziehung Eis und Salz zusammen in solchem Verhältnis aus, dafs die übrig bleibende Lösung ihre Zusammensetzung nicht mehr ändert und die Erstarrungstemperatur daher konstant bleibt.

Geht man statt von einer verdünnten von einer ursprünglich

gesättigten Lösung aus (76), so findet das Umgekehrte statt. Bei der Abkühlung der Lösung scheidet sich Salz aus; die übrig bleibende Lösung wird daher immer weniger konzentrirt, bleibt aber gesättigt für die jeweilige Temperatur. Letztere sinkt bei andauernder Wärmeentziehung immer tiefer, bis die Erstarrungstemperatur der gesättigten Lösung erreicht ist, bei der Salz und Eis gemeinsam sich ausscheiden. Dies ist natürlich die gleiche Temperatur, die oben als tiefster Gefrierpunkt der Salzlösung gefunden war.

Für eine Lösung von Kochsalz in Wasser ist dieser tiefste Erstarrungspunkt, bei dem Eis und Salz gleichzeitig ausfallen, — 22° und die Konzentration der Lösung beträgt dabei 33 Prozent Salz auf 100 g Wasser. Man bezeichnet eine Lösung von solcher Zusammensetzung, daſs sie bei konstanter Temperatur erstarrt, wie ein einheitlicher Körper, als ein Kryohydrat (eutektische Mischung).

110. **Kältemischungen.** Wie beim Schmelzen, so wird auch bei der Auflösung eines festen Körpers in einem Lösungsmittel im allgemeinen Wärme verbraucht oder „gebunden“. Während aber die zur Schmelzung erforderliche Wärme durch Erwärmen von auſsen her geliefert werden muſs, kann die Auflösung eines festen Körpers in einer Flüssigkeit auch ohne äuſsere Wärmezufuhr vor sich gehen. Dann muſs aber die zur Auflösung des festen Körpers nötige Wärmemenge (Lösungswärme) aus den Bestandteilen der Lösung selbst entnommen werden und deren Temperatur demnach sinken. Wirft man eine Handvoll gepulverten Salpeter in ein Glas Wasser, so erkaltet die Lösung um einige Grade. Durch rasche Auflösung von salpetersaurem Ammoniak in der gleichen Gewichtsmenge Wasser erniedrigt sich die Temperatur um 27°, durch Auflösung von Rhodankalium sogar um 34°. Diese Wirkung kann man beträchtlich steigern, wenn man statt Wasser Schnee oder Eis nimmt. Während Eis mit Wasser ein Gemisch nicht unter 0° gibt, löst sich Eis in einer Salzlösung, deren Gefrierpunkt nach Obigem unter 0° liegt, so lange auf, bis durch den groſsen dabei stattfindenden Wärmeverbrauch die Temperatur dieses Gefrierpunktes erreicht ist. Da nun für koncentrirte Lösungen diese Gefrierpunkte sehr tief liegen, so kann man durch Mischen von Schnee oder Eis mit einem passenden Salz beträchtliche Temperaturerniedrigungen erhalten, die gleichzeitig durch den beim Lösen des Salzes und beim Schmelzen des Eises stattfindenden Wärmeverbrauch hervorgebracht werden. Mischt man fein gestoſsenes Eis mit der halben Gewichtsmenge Kochsalz, so sinkt die Temperatur auf 20° C. unter Null. Dieser Mischung bedienen sich die Zuckerbäcker, um Gefrorenes zu bereiten. Schnee und die doppelte Menge krystallisirtes Chlorcalcium geben sogar ein Gemisch von — 42° C. Verdünnte Schwefelsäure, auf Schnee gegossen, zwingt denselben zu raschem Schmelzen und bewirkt dadurch eine Temperaturerniedrigung bis zu 40—50° unter Null.

Die bei der Auflösung verbrauchte Wärme kommt wieder zum Vorschein, wenn der gelöste Körper sich im festen Zustande aus-

scheidet. Wirft man in eine übersättigte (76) Lösung von schwefelsaurem Natrium (Glaubersalz) einen Krystall dieses Salzes, so tritt sofort Krystallbildung ein und die ganze Masse erwärmt sich beträchtlich.

111. **Krystallisationswärme. Verbindungswärme.** Schwefelsaures Kupfer bildet mit Wasser zusammen schöne blaue Krystalle (Kupfervitriol). Beim Erhitzen entweicht das Wasser, welches als fester Bestandteil in den festen Krystallen enthalten war, und das wasserfreie Salz bleibt als hellgraues Pulver zurück. Fügt man nun Wasser hinzu, so wird die Masse wieder blau, indem ein Teil des Wassers als Krystallwasser in den festen Zustand übergeht, und es tritt beträchtliche Erhitzung ein (Krystallisationswärme). Der in der Natur vorkommende Gips, schwefelsaures Calcium mit Krystallwasser, verliert das letztere beim Erhitzen (Brennen); der pulverförmige gebrannte Gips, mit Wasser zu einem Brei angerührt, wird in bekannter Weise zu Abgüssen verwendet, weil der wasserfreie Gips das beigemischte Wasser als Krystallwasser aufnimmt und deswegen die ganze Masse rasch erstarrt; dies geschieht unter bedeutender Erwärmung.

Festwerden flüssigen Wassers findet auch statt beim Löschen des gebrannten Kalkes, das bekanntlich von heftiger Wärmeentwickelung begleitet ist. Der gebrannte Kalk (Calciumoxyd, $CaO$), dargestellt durch Erhitzen von Kalkstein (kohlensaures Calcium, $CaCO_3$) im Kalkofen, wobei die Kohlensäure entweicht, verbindet sich nämlich mit Wasser zu Calciumhydroxyd ($CaH_2O_2$) oder „gelöschtem“ Kalk, welche Verbindung ein fester Körper ist.

Bei den geschilderten Vorgängen, insbesondere bei dem letzteren, wirken jedoch auch chemische Anziehungskräfte mit, welche das Wasser zwingen, in einen festen Körper als Bestandteil einzutreten. Die beim Entstehen einer chemischen Verbindung entwickelte Wärmemenge, welche für jeden solchen Vorgang von bestimmter Gröfse ist, nennt man Verbindungswärme. Bei der Trennung der verbundenen Bestandteile wird dieselbe Wärmemenge wieder verbraucht. Unsere künstlichen Wärmequellen beruhen sämtlich auf der Verbrennung (Oxydation), d. h. auf der Verbindung des Brennstoffes mit dem Sauerstoff der Luft. Zur Messung der Verbindungswärme dienen Wasserkalorimeter, innerhalb deren sich ein Behälter befindet, in welchem die chemische Einwirkung vor sich geht. Die Anzahl der Wärmeeinheiten, welche durch Verbrennung der Gewichtseinheit der folgenden Brennstoffe erzeugt wird, beträgt für:

| | | | |
|---|---|---|---|
| Wasserstoff . . . | 34 460 | Stearinsäure . . . | 9720 |
| Ölbildendes Gas . | 11 860 | Holzkohle . . . . | 8080 |
| Petroleum . . . | 11 094 | Alkohol . . . . . | 7190 |
| Terpentinöl . . . | 10 850 | Steinkohle . . . | 7—8000 |
| Wachs . . . . | 10 500 | Tannenholz . . . . | 4420 |

Auch die tierische Wärme entsteht infolge chemischer Vorgänge, welche im tierischen Körper vor sich gehen, besonders durch Ver-

brennung des in der Nahrung zugeführten Kohlenstoffes durch den eingeatmeten Sauerstoff. Die Körperwärme eines gesunden Menschen beträgt 37,2° C. und wird durch Klima und Alter nur wenig geändert.

112. **Dampfbildung**. Setzt man Wasser in einem Kochgefäfs ans Feuer, so gerät es bald ins Kochen oder Sieden; wir sehen Blasen in dem Wasser aufsteigen, welche dasselbe unter brodelndem Geräusch in heftig aufwallende Bewegung versetzen. Diese Blasen enthalten nicht etwa Luft, sondern gasförmiges Wasser oder Wasserdampf, welchen sie, an der Oberfläche des Wassers zerplatzend, in die Luft entleeren, der er sich nun als durchsichtiges und deswegen ebenso wie die Luft selbst unsichtbares Gas beimischt. Die sichtbare über dem kochenden Wasser sich erhebende Wolke ist kein Dampf, sondern besteht aus äufserst feinen Tröpfchen flüssigen Wassers, welche durch Abkühlung aus dem Dampf sich niedergeschlagen haben, jedoch bald wieder zu unsichtbarem Wassergas sich auflösen. So kann man durch fortgesetztes Heizen die ganze im Gefäfs enthaltene Wassermenge rasch in Dampf verwandeln. Aber nicht nur bei der Siedehitze, sondern bei jedem niedrigeren Wärmegrad geht das Wasser in den gasförmigen Zustand über; stellt man in einer flachen Schale Wasser an die freie Luft, so nimmt die Menge desselben fortwährend ab, bis es endlich ganz verschwunden oder eingetrocknet ist. Diese Dampfbildung, welche ganz ruhig nur an der Oberfläche der Flüssigkeit vor sich geht, nennt man Verdunstung. Durch Erwärmung wird sie befördert, sie hört aber auch in der Kälte nicht auf; selbst Eis und Schnee sieht man bei trockenem, kaltem Wetter durch Verdunstung allmählich verschwinden. Körper, welche leicht und schon bei niedriger Temperatur verdunsten, nennt man flüchtig.

In den betrachteten Fällen erfolgt die Verdampfung bei Gegenwart von Luft, mit welcher sich der entstandene Dampf vermischt. Um die Eigenschaft der Dämpfe für sich kennen zu lernen, lassen wir die Dampfbildung im luftleeren Raume, nämlich in der Torricellischen Leere des Barometers, vor sich gehen. In die erste von vier nebeneinander stehenden Torricellischen Röhren lassen wir mittels einer gekrümmten Pipette von unten etwas Wasser in den luftleeren Raum aufsteigen, in die zweite ein wenig Alkohol, in die dritte ein wenig Äther; die vierte bleibt luftleer, und mifst als Barometer durch die Höhe ihrer Quecksilbersäule den herrschenden Luftdruck. Sofort nach Einbringen der Flüssigkeiten sehen wir die Quecksilbersäulen in den drei ersten Barometerröhren sinken, in der mit Wasser um 17 mm, bei Alkohol um 44 mm, bei Äther um 435 mm, wenn die Temperatur der Umgebung 20° beträgt. Dieses Herabdrücken der Quecksilbersäule kann nicht durch das Gewicht der kleinen über dem Quecksilber befindlichen Flüssigkeitsmenge bewirkt sein (um sie um 17 mm herabzudrücken, wäre eine Wassersäule von 231 mm Höhe erforderlich); es kann nur herrühren von dem Druck oder der Spannkraft eines in dem vorher leeren Raume befindlichen gas-

förmigen Körpers, nämlich des Dampfes, der sich aus der Flüssigkeit gebildet hat. Man bemerkt zugleich, daſs bei gleichbleibender Temperatur sich der Stand der Quecksilbersäulen nicht ändert und die noch zurückgebliebene Flüssigkeit sich nicht weiter vermindert; es bildet sich in dem dargebotenen Raum kein weiterer Dampf mehr, und wir sagen deshalb, dieser Raum sei mit Dampf gesättigt oder mit gesättigtem Dampf erfüllt.

Um das Verhalten solcher Dämpfe genauer kennen zu lernen, fülle man eine am einen Ende zugeschmolzene, 80 bis 90 cm lange Glasröhre mit Quecksilber bis auf einen kleinen Raum, welchen man nun noch mit der zu verdampfenden Flüssigkeit, z. B. mit Äther, vollgieſst. Man verschlieſst nun die Röhre, welche jetzt nur die beiden Flüssigkeiten, aber keine Luft enthält, luftdicht mit dem Finger, bringt die verschlossene Mündung unter die Oberfläche einer in tiefem Gefäſs befindlichen Quecksilbermenge, entfernt den Finger und stellt die Röhre lotrecht (Fig. 108). Über der Quecksilbersäule, welche noch in der Röhre stehen geblieben ist (sie ist bei 20° um 435 mm niedriger als der Barometerstand), gewahren wir ein wenig Flüssigkeit; der darüber befindliche Raum aber ist mit durchsichtigem und daher unsichtbarem Ätherdampf erfüllt. Vergröſsert man nun diesen Raum, indem man die Röhre in die Höhe zieht, so ändert sich der Stand der Quecksilbersäule und somit auch der Druck des Dampfes nicht, aber die Flüssigkeitsmenge nimmt ab; es bildet sich aus ihr in dem Maſse, wie der Raum gröſser wird, neuer Dampf von gleichem Druck, und der Raum bleibt mit Dampf gesättigt, solange noch flüssiger Äther übrig ist. Enthielte der obere Teil der Röhre statt gesättigten Dampfes etwas Luft, so würde sich deren Druck bei Vergröſserung ihres Raumes nach dem Mariotteschen Gesetz vermindern, und die Quecksilbersäule müſste steigen. Letzteres tritt auch bei unserem Dampf ein, sobald aller Äther verdampft ist; wird jetzt durch weiteres Herausziehen der Röhre der Dampfraum noch mehr vergröſsert, so steigt die Quecksilbersäule, und zeigt dadurch an, daſs der Druck des nun nicht mehr gesättigten Dampfes abnimmt, und zwar im umgekehrten Verhältnis des Volumens. Drückt man alsdann die Röhre wieder in das Quecksilber hinab, so wächst anfangs die Spannkraft des nicht gesättigten Dampfes dem Mariotteschen Gesetz entsprechend mit seiner Dichte, die Quecksilbersäule wird wieder niedriger, bis ihre ursprüngliche Höhe und damit der Sättigungszustand erreicht ist. Verkleinert man durch ferneres Herabdrücken den Dampfraum noch mehr, so beobachtet man, daſs von nun an die Höhe der Quecksilbersäule und somit auch die Spannkraft des Ätherdampfes



Fig. 108.
Verhalten gesättigten Dampfes.

(435 mm) unverändert bleibt; gleichzeitig sieht man flüssigen Äther in immer zunehmender Menge über dem Quecksilber sich ansammeln, bis endlich die ganze Dampfmenge zu Flüssigkeit verwandelt ist. Während also der ungesättigte Dampf dem Mariotteschen Gesetz gehorcht und sich in dieser Hinsicht wie ein Gas verhält, indem sein Druck im umgekehrten Verhältnis zum Rauminhalt sich ändert, fügt sich der gesättigte Dampf diesem Gesetz nicht; durch Raumverminderung wird bei unveränderter Temperatur seine Spannkraft nicht erhöht, sondern es wird nur bewirkt, daſs eine entsprechende Dampfmenge sich zu Flüssigkeit verdichtet, während der übrig gebliebene Raum mit gesättigtem Dampf von unveränderter Spannkraft gefüllt bleibt. Der Druck, welchen der Dampf im Sättigungszustand ausübt (Sättigungsdruck), ist demnach der gröſste, welchen er bei der herrschenden Temperatur erreichen kann; man bezeichnet daher den gesättigten Dampf auch als solchen, der für seine Temperatur die höchstmögliche Spannkraft besitzt, oder der sich im Maximum seiner Spannkraft befindet.

113. **Spannkraft gesättigter Dämpfe.** Wird ein Raum, welcher gesättigten Dampf nebst der Flüssigkeit, aus welcher derselbe entstanden ist, enthält, höher erwärmt, so verdampft eine neue Flüssigkeitsmenge, und der Raum sättigt sich für diese höhere Temperatur mit Dampf von gröſserer Dichte und höherem Druck. Kühlt man nachher den Raum wieder ab auf die vorige Temperatur, so schlägt sich die neugebildete Dampfmenge als Flüssigkeit nieder, und der Raum bleibt für die niedrige Temperatur mit der früheren Dampfmenge gesättigt. Jeder Temperatur entspricht eine bestimmte Spannkraft des gesättigten Dampfes; um dieselbe beispielsweise für Wasserdampf zu ermitteln, bringt man ein wenig Wasser, wie vorhin, in den luftleeren Raum eines Barometers (Fig. 109), das daselbst sofort teilweise verdampft und den Raum mit gesättigtem Dampfe füllt. Die Barometerröhre wird nunmehr mit einem weiten Rohr umgeben, welches Wasser enthält, das man nach und nach von 0° auf 100° erwärmt. Mit wachsender Temperatur sieht man die Quecksilbersäule in der Röhre immer tiefer sinken, bis bei 100° das Quecksilber innerhalb und auſserhalb der Röhre gleich hoch steht. Die Spannkraft des Dampfes für irgend eine Temperatur aber findet man, wenn man die Höhe jener Quecksilbersäule von derjenigen in einem gleichzeitig beobachteten Barometer abzieht. Die nachfolgende Tabelle gibt die Spannkraft des gesättigten Wasserdampfes bis 100°, ausgedrückt durch die Höhe der Quecksilbersäule (in Millimetern), welcher sie das Gleichgewicht hält.

| Temperatur °C. | Spannkraft mm | Temperatur °C. | Spannkraft mm |
|---|---|---|---|
| —30 | 0,4 | — 5 | 3,1 |
| —25 | 0,6 | 0 | 4,5 |
| —20 | 0,9 | 5 | 6,5 |
| —15 | 1,4 | 10 | 9,2 |
| —10 | 2,1 | 15 | 12,7 |

| Temperatur °C. | Spannkraft mm | Temperatur °C. | Spannkraft mm |
|---|---|---|---|
| 20 | 17,4 | 65 | 186,9 |
| 25 | 23,6 | 70 | 233,1 |
| 30 | 31,6 | 75 | 288,5 |
| 35 | 41,8 | 80 | 354,6 |
| 40 | 54,9 | 85 | 433,0 |
| 45 | 71,4 | 90 | 525,5 |
| 50 | 92 0 | 95 | 633,8 |
| 55 | 117,5 | 100 | 760,0 |
| 60 | 148,8 | | |

Wie diese Tabelle zeigt, liefert das Wasser beim Gefrierpunkt (0°) noch Dampf, der die Quecksilbersäule um $4^1/_2$ mm herabzudrücken vermag. Selbst aus dem Eis entwickelt sich noch Wasserdampf; um für Temperaturen unter dem Gefrierpunkt die Spannkraft zu messen, umgibt man den oberen Teil der Barometerröhre mit einer entsprechenden Kältemischung. Beim Siedepunkt des Wassers (100°) erreicht der gesättigte Wasserdampf den nämlichen Druck wie die atmosphärische Luft oder den Druck einer Atmosphäre, welcher dem Druck einer Quecksilbersäule von 760 mm Höhe das Gleichgewicht hält. Das Quecksilber in der Röhre ist jetzt bis zur Oberfläche des äuſseren Quecksilbers herabgedrückt, und bei noch höherer Erwärmung würde der Dampf im stande sein, den Luftdruck zu überwinden und unten aus der Röhre durch das Quecksilber zu entweichen. Für Temperaturen über dem Siedepunkt ist daher das beschriebene Verfahren zur Bestimmung der Spannkraft des Dampfes nicht mehr brauchbar. Man kann sich alsdann der Vorrichtung Fig. 110 bedienen; eine zweischenklige Röhre mit einem kurzen weiten und einem engen längeren Schenkel wird, während die Spitze des kurzen Schenkels noch offen ist, zum Teil mit Quecksilber gefüllt, welches sich in beiden Schenkeln gleich hoch stellt. Über das Quecksilber im kurzen Schenkel bringt man Wasser und erhält dasselbe so lange im Kochen, bis der sich entwickelnde Dampf alle Luft aus diesem Schenkel ausgetrieben hat und schmilzt dann die Spitze rasch zu. Bei 100° steht alsdann das Quecksilber in beiden Schenkeln, von denen der längere offen geblieben ist, gleich hoch, weil der gesättigte Dampf von 100° dem in den offenen Schenkel hineinwirkenden Druck der Atmosphäre das Gleichgewicht hält.

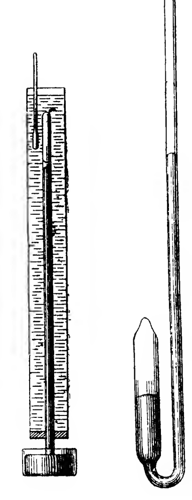


Fig. 109. Dampfbarometer. Fig. 110. Dampfmanometer.

Erwärmt man aber höher, indem man z. B. den unteren Teil der Vorrichtung in ein heiſses Ölbad taucht, so steigt das Quecksilber im langen Schenkel, der ein offenes Manometer (84) bildet, und die gehobene Quecksilbersäule gibt den Überschuſs des Dampfdrucks über den äuſseren Luftdruck an. Beträgt z. B. die Höhe dieser

Quecksilbersäule 760 mm, so hält die Spannkraft des Dampfes dem doppelten Luftdruck oder einem Druck von zwei Atmosphären das Gleichgewicht, deren eine durch den Druck der atmosphärischen Luft selbst, die andere durch den gleichgrofsen Druck der 760 mm hohen Quecksilbersäule dargestellt wird. Überhaupt pflegt man der besseren Übersicht wegen diese höheren Dampfspannungen statt unmittelbar durch die entsprechenden Quecksilberhöhen lieber in „Atmosphären“ (zu je 760 mm Quecksilber) auszudrücken, wie dies auch in der folgenden kleinen Tabelle, welche die Spannkraft des gesättigten Wasserdampfes für höhere Temperaturen gibt, geschehen ist.

| Temperatur °C. | Spannkraft Atm. | Temperatur °C. | Spannkraft Atm. |
|---|---|---|---|
| 100 | 1 | 161,5 | 6,5 |
| 111,7 | 1,5 | 165,3 | 7 |
| 120,6 | 2 | 168,2 | 7,5 |
| 127,8 | 2,5 | 170,8 | 8 |
| 133,9 | 3 | 175,8 | 9 |
| 139,2 | 3,5 | 180,3 | 10 |
| 144,0 | 4 | 213,0 | 20 |
| 148,3 | 4,5 | 236,2 | 30 |
| 152,2 | 5 | 252,5 | 40 |
| 155,9 | 5,5 | 265,9 | 50 |
| 159,2 | 6 | | |

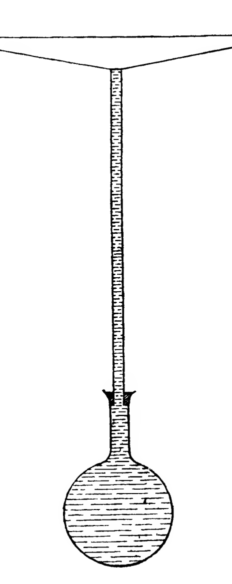
Man sieht aus dieser und der vorigen Tabelle, dafs die Spannkraft des gesättigten Dampfes mit steigender Temperatur in immer rascherem Verhältnis zunimmt, weil ja nicht blofs die Temperatur, sondern durch erneute Verdampfung auch die Dichte wächst. Damit aber neuer Dampf sich bilden und der Raum sich sättigen könne, mufs dafür gesorgt werden, dafs noch Flüssigkeit vorhanden und mit dem Dampf in Berührung sei. Wäre nämlich bereits alle Flüssigkeit verdampft, und würde die Temperatur noch weiter gesteigert, so würde sich der Dampf bei gleichbleibendem Druck der Temperaturzunahme proportional ausdehnen, oder es würde, wenn man ihm keine Ausdehnung gestattete, sein Druck in ebendiesem Verhältnis wachsen (Mariotte-Gay-Lussacsches Gesetz), der Raum enthält dann nicht mehr die ganze Dampfmenge, die er bei der herrschenden Temperatur aufzunehmen vermöchte, und ist daher nicht mehr gesättigt. Solchen ungesättigten Dampf nennt man auch überhitzt, weil seine Temperatur höher ist als diejenige gesättigten Dampfes von gleicher Spannkraft. Der Druck des gesättigten Dampfes ist nur von der Temperatur abhängig, der des überhitzten von Temperatur und Volumen.

Durch Zusatz einer löslichen Substanz zu einer Flüssigkeit wird die Spannkraft ihres gesättigten Dampfes proportional der Menge des gelösten Stoffes vermindert. In demselben Lösungsmittel bringen Stoffe, deren Mengen im Verhältnis ihrer Molekulargewichte stehen, gleiche Druckverminderung hervor; äquimolekulare Lösungen haben gleichen Dampfdruck (Raoult, 1887). Man kann diesen Satz, welcher übrigens nur für sehr verdünnte Lösungen gilt, zur Bestimmung von Molekulargewichten benutzen (vgl. 109).

114. **Sieden** oder **Kochen** nennt man, wie schon erwähnt, die unter Aufwallen vor sich gehende Verdampfung einer Flüssigkeit, bei welcher sich nicht nur an der Oberfläche, sondern auch im Innern der Flüssigkeit Dampf bildet. Im Innern einer Flüssigkeit aber können Dampfblasen nur dann bestehen, wenn die Spannkraft des in ihnen enthaltenen Dampfes dem auf der Flüssigkeit lastenden Druck das Gleichgewicht zu halten vermag. Eine Flüssigkeit wird also dann sieden, wenn sie diejenige Temperatur erreicht hat, bei welcher die Spannkraft ihres gesättigten Dampfes dem äufseren Drucke gleich ist. Diese Temperatur, der Siedepunkt, ist demnach von dem äufseren Druck abhängig und liegt um so tiefer, je geringer dieser Druck ist. Der normale Siedepunkt des Wassers, welchen man als festen Punkt der Thermometerskala gewählt und mit 100° bezeichnet hat, ist diejenige Temperatur, bei welcher der gesättigte Wasserdampf eine dem normalen Luftdruck gleiche Spannkraft besitzt oder einer Quecksilbersäule von 760 mm Höhe das Gleichgewicht hält. Macht man ein Thermometer bei einem anderen Luftdruck, z. B. bei einem Barometerstand von 720 mm, so ergibt sich aus einer ausführlicheren Spannkraftstabelle, dafs der Wasserdampf schon bei 98,5° letzteren Druck erreicht, und dafs der so ermittelte Fundamentalabstand, um eine richtige Thermometerskala zu erhalten, nicht in 100, sondern in 98,5 Teile geteilt werden mufs. Auf hohen Bergen oder Hochebenen, wo der Luftdruck geringer ist als am Meeresspiegel, erfolgt das Sieden bei weniger als 100°. Auf dem Gipfel des Montblanc z. B., in einer Höhe von 4775 m ü. M., wo der Barometerstand nur noch 417 mm beträgt, siedet das Wasser schon bei 84°, d. h. bei derjenigen Temperatur, bei welcher die Spannkraft des Wasserdampfes ebenfalls 417 mm beträgt. Wenn man daher an einem hochgelegenen Orte den Siedepunkt des in einem offenen Gefäfs kochenden Wassers bestimmt und die zugehörige Spannkraft aus einer Spannkraftstabelle entnimmt, so weifs man hiermit auch den dort herrschenden Barometerstand, ohne ein Barometer wirklich beobachtet zu haben, und kann nun aus dem so ermittelten Luftdruck die Höhe des Beobachtungsortes über der Meeresfläche berechnen (83). Ein zu diesem Zweck bestimmtes Thermometer, dessen in sehr kleine Unterabteilungen geteilte Skala nur wenige Grade unterhalb des normalen Siedepunktes umfafst, heifst Hypsothermometer. Unter der Glocke der Luftpumpe kann man das Wasser bei jeder beliebigen niedrigen Temperatur zum Sieden bringen. In einem etwa zur Hälfte gefüllten Glaskolben werde Wasser zum Sieden gebracht, bis alle Luft durch die entweichenden Dämpfe ausgetrieben ist, sodann die Mündung durch einen luftdicht schliefsenden Kork verschlossen und der Kolben mit dem Hals nach unten aufgestellt. Über dem Wasser, welches nun unter den normalen Siedepunkt erkaltet, befindet sich nur noch Wasserdampf, welcher einen seiner Temperatur entsprechenden Druck auf die Flüssigkeit ausübt. Giefst man nun kaltes Wasser auf den Glaskolben, so beginnt das

Wasser im Innern wieder lebhaft zu sieden, weil der auf der Flüssigkeit lastende Druck des Dampfes durch die Abkühlung plötzlich vermindert wird.

In einem offenen Gefäfs kann man eine Flüssigkeit niemals über den Siedepunkt erhitzen, welcher dem zur Zeit herrschenden Luftdruck entspricht, weil, sobald das Sieden begonnen hat, alle zugeführte Wärme nicht zur Erwärmung, sondern zur Überführung der Flüssigkeit in den gasförmigen Zustand verbraucht wird. In einem geschlossenen Gefäfs dagegen steigert sich bei fortgesetztem Erhitzen, da der Dampf nicht entweichen kann, die auf die Flüssigkeit pressende Dampfspannung immer mehr und mit ihr der Siedepunkt; unter einem Druck von zwei Atmosphären z. B. siedet das Wasser erst bei 121$^0$, unter drei Atmosphären bei 134$^0$ u. s. f. Hierauf beruht der Dampfkochtopf (Papins Topf, 1681), welcher den Zweck hat, das Wasser und die in demselben zu kochenden Speisen höher zu erhitzen, als es in offenen Kochgefäfsen möglich wäre, und dadurch raschere und vollständigere Wirkungen zu erzielen. Er besteht in einem eisernen Topf mit genau schliefsendem und durch Schrauben festgehaltenem Deckel, der mit einem Hahn zum Ablassen des Dampfes und mit einem Sicherheitsventil versehen ist, welches verhindert, dafs die Spannkraft des Dampfes eine gewisse Grenze übersteige und den Topf der Gefahr des Zerspringens aussetze.


Fig. 111.

Setzt man das Innere eines solchen geschlossenen Kochgefäfses mit einer Luftpumpe in Verbindung, mittels deren man die Luft über der Flüssigkeit nach Belieben verdichten und verdünnen kann, und beobachtet den höchsten Stand, welchen das in das Gefäfs hineinragende Thermometer jedesmal erreicht, so erfährt man den Siedepunkt bei diesem Drucke, d. h. die Temperatur, bei welcher die Spannkraft des Dampfes diesem an einem gleichzeitig eingeschalteten Manometer abzulesenden Druck gleich ist. Nach dieser Methode wurden namentlich die in obiger Tabelle angegebenen Spannkräfte, welche eine Atmosphäre übersteigen, ermittelt.

Auch der Eigendruck des Wassers bewirkt eine Siedepunktserhöhung in den tieferen Schichten. Setzt man auf eine Kochflasche mit gut schliefsendem Stopfen ein Glasrohr von 1 m Höhe (Fig. 111) und füllt den ganzen Apparat mit Wasser, so beginnt das Wasser in der Kochflasche erst bei 102,6$^0$ zu sieden. Wird dabei durch die aufsteigenden Dampfblasen das Wasser aus dem Heizrohr hinausgeworfen, so tritt infolge der plötzlichen Druckverminderung ein

heftiges, explosionsartiges Aufkochen des Wassers in der Flasche ein. Sorgt man durch ein trichterförmiges Auffanggefäſs am oberen Ende des Steigrohres dafür, daſs das ausgeworfene Wasser in den Apparat zurückflieſst, so wiederholen sich diese Eruptionen in regelmäſsigen Zwischenräumen (Erklärung der Geysire durch Bunsen).

Wird der Siedepunkt einer Flüssigkeit als ein Merkmal derselben angegeben, so versteht man darunter immer diejenige Temperatur, bei welcher die Spannkraft ihres gesättigten Dampfes 760 mm beträgt. Die Siedepunkte einiger Flüssigkeiten bei diesem Normaldruck gibt die folgende Tabelle.

| | | | |
|---|---|---|---|
| Stickstoffoxydul . | —88° C. | Alkohol . . . . | 78° C. |
| Kohlensäure . . | —78 „ | Benzol . . . . | 81 „ |
| Ammoniak . . | —38 „ | Wasser . . . . | 100 „ |
| Chlor . . . . | —34 „ | Terpentinöl . . | 159 „ |
| Cyan . . . . | —20 „ | Anilin . . . . | 184 „ |
| Schwefl. Säure . | —10 „ | Naphthalin . . . | 218 „ |
| Äther . . . . | 35 „ | Quecksilber . . | 357 „ |
| Schwefelkohlenst. | 46 „ | Schwefel . . . | 444 „ |
| Chloroform . . | 61 „ | Zink . . . . . | 930 „ |

Substanzen, die in einer Flüssigkeit aufgelöst sind, erhöhen deren Siedepunkt, um so mehr, je koncentrirter die Lösung ist. Da sie nämlich den Dampfdruck der Flüssigkeit erniedrigen, so wird der dem äuſseren Druck gleiche Dampfdruck erst bei höherer Temperatur erreicht. Gesättigte Kochsalzlösung siedet bei 109°, Chlorcalciumlösung bei 179°. Der aus der Lösung sich entwickelnde Dampf ist aber reiner Wasserdampf. Auch aus diesen Siedepunktserhöhungen können an verdünnten Lösungen die Molekulargewichte der gelösten Stoffe bestimmt werden.

Während das Sieden des Wassers in metallenen Gefäſsen bei 100° eintritt, bemerkt man in Glasgefäſsen oft eine Verzögerung des Siedens, d. h. das Wasser erwärmt sich etwas höher als 100°, und das Sieden tritt dann stoſsweise ein. Ein solcher Siedeverzug zeigt sich besonders leicht bei ausgekochtem Wasser, aus welchem die absorbirte Luft vertrieben ist, weil hier die aufsteigenden Luftbläschen fehlen, welche die Bildung von Dampfblasen begünstigen. Man kann solche Siedeverzüge dadurch verhindern, daſs man Platindraht, Sand oder andere feste Körperchen in das Wasser wirft, welche die an ihrer Oberfläche absorbirte Luft freigeben und dadurch das Sieden erleichtern. Siedeverzüge können wegen der oft plötzlich erfolgenden Dampfentwickelung zu Explosionen führen.

115. **Leidenfrostsche Erscheinung.** Bringt man etwas Wasser in eine glühende Metallschale, so bildet es einen abgerundeten Tropfen, welcher die Gefäſswand nicht unmittelbar berührt, sondern, von einer dünnen Dampfschicht getragen, unter lebhafter Bewegung, ohne zu sieden, allmählich verdunstet. Entfernt man die Flamme, so kann der schwächer gespannte Dampf den Tropfen nicht mehr tragen; derselbe kommt mit der immer noch heiſsen Gefäſswand in Berührung und verdampft nun plötzlich unter stürmischer Dampf-

bildung. Man nennt diese Erscheinung nach ihrem Entdecker den „Leidenfrostschen Tropfen“; alle Flüssigkeiten sind fähig, ihn zu bilden, nur mufs die Temperatur der Metallfläche um so höher sein, je schwerer verdampfbar die Flüssigkeit ist, oder je weniger leicht sich die dünne und die Wärme nur schlecht leitende Dampfschicht bildet, welche die Flüssigkeit hindert, mit der heifsen Fläche in Berührung zu kommen. Dampfkesselexplosionen werden manchmal dadurch verursacht, dafs bei zu niedrigem Wasserstand die Kesselwände ins Glühen geraten und dann das im Kessel befindliche Wasser einen einzigen grofsen Leidenfrostschen Tropfen bildet, der bei darauf folgender Abkühlung durch plötzliche massenhafte Dampfbildung den Kessel zertrümmert. Die merkwürdige Thatsache, dafs man die befeuchtete Hand ungestraft in geschmolzenes Eisen tauchen kann, erklärt sich ebenfalls aus der Bildung einer dünnen Dampfschicht, welche die Hand als ein schützender Handschuh umhüllt und mit dem heifsen Metall in Berührung zu kommen hindert.

116. **Verdampfung im lufterfüllten Raum.** In einem luftleeren Raum, wie über dem Quecksilber des Barometers, erfolgt die Dampfbildung bis zur Sättigung fast augenblicklich, in einem mit Luft oder anderen Gasen erfüllten Raum geht die Verdampfung nur langsam vor sich, schliefslich erreicht aber der Dampf denselben Grad der Sättigung oder dasselbe Maximum der Spannkraft, als wenn keine Luft oder kein anderes Gas vorhanden wäre, und sein Druck fügt sich dem Druck der bereits vorhandenen Gase oder Dämpfe hinzu (Daltons Gesetz, 97).

Bringt man z. B. in eine Flasche, durch deren luftdicht schliefsenden Kork ein Manometer gesteckt ist, etwas Alkohol, so sieht man das Quecksilber im äufseren offenen Schenkel des Manometers langsam steigen, bis es (bei $20^0$) 44 mm höher steht als im inneren Schenkel; zu dem Druck der in der Flasche eingeschlossenen Luft ist also der Druck des gesättigten Alkoholdampfes von $20^0$ hinzugekommen.

In ruhiger Luft geht die Verdunstung nur sehr langsam vor sich, weil die mit der Flüssigkeitsoberfläche in unmittelbarer Berührung stehende Luftschicht sich mit Dampf sättigt, welchen sie nur sehr langsam durch allmählichen Austausch (Diffusion, 97) an die darüber befindlichen Luftschichten abgibt, und sonach die Verdunstung hemmt; durch Luftzug, welcher die gesättigte Luft rasch entführt und ungesättigte an ihre Stelle bringt, wird daher die Verdunstung sehr befördert.

117. **Verdampfungswärme.** Um die Vorgänge bei der Verdampfung genauer zu verfolgen, erhitzen wir das Wasser in einem Glaskölbchen, durch dessen zweimal durchbohrten Kork einerseits ein Thermometer, andererseits zum Entlassen des Dampfes eine dicht unter dem Kork endigende Glasröhre durchgesteckt ist. Das Thermometer steigt, bis das Wasser zu sieden beginnt; nun aber bleibt es, wie bereits mehrfach erwähnt wurde, solange das Sieden dauert, auf einem bestimmten Punkt stehen, nämlich auf der dem herrschen-

den Luftdruck entsprechenden Siedetemperatur, und zwar zeigt es diese Temperatur, mag nun die Kugel des Thermometers in das siedende Wasser oberflächlich eingetaucht oder im oberen Teil des Kölbchens nur vom Dampf umspült sein. Der aus dem Wasser sich erhebende Dampf hat also dieselbe Temperatur wie das verdampfende Wasser selbst. Die von der heizenden Flamme unausgesetzt zugeführte Wärme bringt demnach keine Erwärmung hervor, sie wirkt nicht auf das Thermometer; aber sie unterhält das Kochen, indem sie aufser dem auf der Flüssigkeit lastenden äufseren Druck die zwischen den Wasserteilchen stattfindende Anziehung (Kohäsion) überwindet und das flüssige Wasser in den neuen gasförmigen Zustand umarbeitet. Man nennt die zu dieser Arbeit verbrauchte Wärmemenge die Verdampfungswärme, oder auch, da sie für das Gefühl und das Thermometer verschwindet und sich in dem Dampf gleichsam als Bestandteil desselben verborgen zu haben scheint, gebundene oder latente Dampfwärme. Um die Verdampfungswärme zu ermitteln, leitet man den Dampf durch ein schlangenförmig gewundenes Metallrohr, welches in einem Kühlgefäfs von einer gewogenen Menge kalten Wassers von bekannter Temperatur umgeben ist. Der Dampf schlägt sich in dem Schlangenrohr zunächst als Wasser von 100° nieder, indem er die zu seiner Bildung verbrauchte Wärme an das umgebende Wasser wieder abgibt; des weiteren kühlt sich das gebildete Wasser von 100° noch ab bis zu einer gewissen Temperatur, die man am unteren Ende des Schlangenrohrs an dem hier austretenden Wasser messen kann. Durch beide Umstände wird das Kühlwasser auf eine zu messende Temperatur erwärmt. Aus dem Gewicht und der Temperaturerhöhung des Kühlwassers berechnet man leicht die an letzteres abgegebene Wärmemenge, und findet das Gewicht des Dampfes, welches diese Wärmemenge enthielt, wenn man das vorher samt Inhalt gewogene Kölbchen nach Beendigung des Versuches wieder wägt. Man findet auf diese Weise, dafs 1 kg Dampf von 100°, indem er sich zu 1 kg Wasser von 100° verdichtet, 10 kg Wasser um 53,6° oder, was dasselbe ist, 536 kg Wasser um 1° zu erwärmen vermag, und dafs sonach 536 Wärmeeinheiten erforderlich sind, nm 1 kg Wasser von 100° in Dampf von 100° überzuführen. Von der Fähigkeit des Dampfes, bei seiner Verdichtung eine so beträchtliche Wärmemenge auszugeben, wird in der Dampfheizung eine bekannte Anwendung gemacht. Die Verdampfungswärmen einiger anderer Flüssigkeiten sind: Alkohol 209. Äther 91, Terpentinöl 69 Wärmeeinheiten.

118, Bei der **Destillation** werden die Dämpfe einer siedenden Flüssigkeit in einen kalten Raum geleitet, wo sie unter Abgabe ihrer Verdampfungswärme sich wieder in Flüssigkeit zurückverwandeln. Man benutzt dieses Verfahren, um eine Flüssigkeit von anderen mit ihr gemischten weniger leicht verdampfbaren Flüssigkeiten oder sonstigen beigemischten Stoffen getrennt zu erhalten, da die flüchtigen Bestandteile vorzugsweise, gelöste oder nur mechanisch bei-

gemischte Substanzen gar nicht verdampfen. Aus dem Brunnen- und Flufswasser, welches kohlensauren Kalk, Chloride u. s. w. enthält, gewinnt man reines Wasser durch Destillation. Frei aufgefangenes Regenwasser ist in der Werkstätte der Natur destillirtes und darum reines Wasser.

Zur Destillation im Laboratorium bedient man sich des in Fig. 112 abgebildeten Apparates. Die in der Kochflasche durch Sieden der Flüssigkeit entwickelten Dämpfe strömen durch das angesetzte Glasrohr in ein langes schräg nach unten verlaufendes Rohr, das mit einem Mantel umgeben ist; in diesen läfst man kaltes Wasser von unten einfliefsen und oben abfliefsen (Liebigscher Kühler). In diesem Rohr verdichten sich die Dämpfe und die Kondensationsflüssigkeit tropft aus dem Kühler in die Vorlage. Bei der Destillation

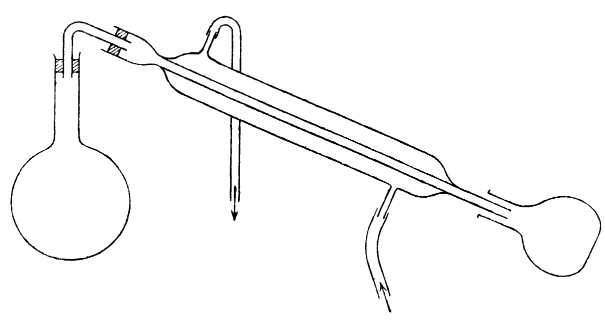


Fig. 112.
Destillirapparat.

sehr flüchtiger Flüssigkeiten mufs das Kühlrohr sehr lang sein; man wickelt es dann der Raumersparnis halber schraubenförmig auf (Kühlschlange).

Aus den Dämpfen mancher bei gewöhnlicher Temperatur fester Körper (Salmiak, Schwefel, Jod etc.) setzt sich der betreffende Stoff im Kühlraum gleich in fester, gewöhnlich krystallinischer Form ab; in diesem Fall nennt man das Verfahren Sublimation. Schwefelblumen z. B. sind nichts anderes als sublimirter und deswegen sehr reiner Schwefel.

119. **Verdunstungskälte.** Auch bei der gewöhnlichen langsamen Verdunstung wird Wärme zur Trennung der Flüssigkeitsteilchen voneinander und zur Überwindung des äufseren Drucks verbraucht oder „gebunden". Man mufs beispielsweise einem Kilogramm Wasser von $0^0$ 607 Wärmeeinheiten zuführen, um es in Dampf von $0^0$ zu verwandeln. Findet dabei keine Wärmezufuhr von aufsen statt, so mufs die nötige Verdampfungswärme aus der Flüssigkeit selbst oder von anderen Körpern, mit denen die verdunstende Flüssigkeit in Berührung ist, entnommen werden; diese werden daher abgekühlt, es entsteht Verdampfungs- oder Verdunstungskälte. Die Erfrischung, welche ein Gewitterregen an einem heifsen Sommertag hervorbringt,

rührt nicht bloſs her von der tieferen Temperatur des aus kalter Höhe herabfallenden Regenwassers, wir verdanken sie vielmehr zum groſsen Teil der nach dem Regen lebhaft vor sich gehenden Verdunstung und Wärmebindung. Setzen wir uns schweiſsbedeckt der Zugluft aus, so wird unserer Haut durch die rasch vor sich gehende Verdunstung Wärme entzogen. Wenn man sich mit einem Fächer Luft zuweht, empfindet man Kühle, nicht weil die zugewehte Luft kälter ist als die, welche uns vorher umgab, sondern weil der erregte Luftzug die Verdunstung befördert. Gieſst man eine leicht verdampfbare („flüchtige“) Flüssigkeit, z. B. Äther, auf die Hand, so fühlt man eine beträchtliche Erkaltung, weil der Äther bei seiner Verdunstung der Hand die hierzu nötige Verdampfungswärme entnimmt. Ein Thermometer, dessen mit einem baumwollenen Läppchen umwickelte Kugel man mit Äther benetzt, sinkt infolge der Verdunstung des letzteren um etwa 20°. Auf ein Brettchen bringe man einige Wassertropfen, setze darauf ein dünnwandiges Blechschälchen, in welches man Äther gieſst; wird nun der Äther dadurch, daſs man mittels eines Blasebalgs darauf bläst, zum raschen Verdunsten gebracht, so kühlt er sich so bedeutend ab, daſs das Wasser unter dem Schälchen gefriert und dasselbe an das Brettchen kittet. Hierauf beruht eine Methode zur künstlichen Erzeugung von Eis; in Röhren, welche von einer Flüssigkeit von niederem Gefrierpunkt, z. B. von einer Salzlösung, umgeben sind, wird Äther (oder flüssiges Ammoniak) zum raschen Verdunsten gebracht; dadurch wird jener Flüssigkeit soviel Wärme entzogen, daſs sie tief unter den Gefrierpunkt des Wassers erkaltet und daher, wenn sie durch andere von Wasser umgebene Röhren geleitet wird, dieses zum Gefrieren bringt.

Auch durch seine eigene Verdunstungskälte kann man Wasser zum Gefrieren bringen, wenn man nur dafür sorgt, daſs die Verdunstung rasch genug vor sich geht. Zu dem Ende muſs die Verdunstung in einem luftleeren Raume erfolgen. Man bedient sich dazu am einfachsten des Kryophors (Wollaston, 1813). Derselbe besteht aus zwei Glaskugeln, welche durch ein Glasrohr miteinander verbunden sind und auſser Wasser nur Wasserdampf, aber keine Luft enthalten, da diese durch Sieden aus dem anfangs noch offenen Gefäſs ausgetrieben wurde. Taucht man die eine Kugel in eine Kältemischung aus Eis und Kochsalz, so werden die in ihr enthaltenen Wasserdämpfe verdichtet und der Dampfdruck in dem ganzen Innenraum des Gefäſses so sehr erniedrigt, daſs das Wasser in der anderen Kugel lebhaft verdampft und in die erste Kugel hinüberdestillirt; hierzu wird soviel Wärme verbraucht, daſs das Wasser zu Eis erstarrt. Anstatt die Dämpfe durch starke Abkühlung zu verdichten, kann man sie auch durch Schwefelsäure absorbiren lassen. In dem Apparat Fig. 113 enthält das Gefäſs *B* koncentrirte Schwefelsäure, die in groſser Oberfläche mit dem Dampf des in *A* enthaltenen Wassers in Berührung steht. Wird der Apparat mit der Luftpumpe (*L*) luftleer gemacht, so absorbirt die Schwefel-

säure die Wasserdämpfe so rasch, dafs das Wasser in $A$ durch die schnelle Verdunstung bis auf $0^0$ abgekühlt wird und dann erstarrt (Leslie 1813, Carré's Eispumpe, 1867).

120. **Spezifisches Gewicht eines Dampfes** oder **Dampfdichte** ist die Zahl, welche angibt, wieviel mal schwerer der Dampf ist als ein gleicher Raumteil Luft von gleichem Druck und gleicher Temperatur. Um die Dichte eines Dampfes zu kennen, mufs man aufser seinem Gewicht noch sein Volumen, seinen Druck und seine Temperatur ermitteln; aus den drei letzteren Gröfsen kann man dann vermöge des Mariotte-Gay-Lussacschen Gesetzes das Gewicht eines

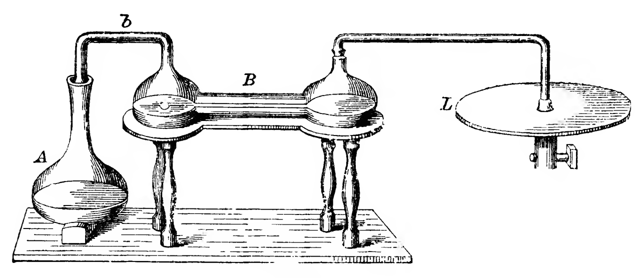



**Fig. 113.**
**Gefrierapparat.**

gleichgrofsen Volumens Luft von gleichem Druck und gleicher Temperatur leicht berechnen, womit man in das Gewicht des Dampfes zu dividiren hat, um das spezifische Gewicht desselben auf Luft als Einheit bezogen zu finden.

Um die genannten Gröfsen zu bestimmen, läfst man nach einem von Gay-Lussac zuerst angewendeten und von Hofmann (1869) verbesserten Verfahren in den leeren Raum eines Barometers, dessen weites Rohr in Kubikcentimeter geteilt ist, ein kleines Fläschchen mit eingeriebenem Stöpsel aufsteigen, das eine gewogene Menge der zu verdampfenden Flüssigkeit enthält. Die Barometerröhre ist von einem weiteren Rohr umgeben, durch welches aus einem kleinen Kessel die Dämpfe einer Flüssigkeit (Wasser oder Anilin) von bekanntem Siedepunkt geleitet werden. Infolge der Erwärmung treibt die in dem kleinen Fläschchen enthaltene Flüssigkeit den Stöpsel heraus und verwandelt sich vollständig in überhitzten Dampf, der die Temperatur jenes Siedepunktes annimmt. Das Gewicht dieses Dampfes ist aus der Wägung des Fläschchens bereits bekannt, sein Rauminhalt wird an der eingeteilten Barometerröhre abgelesen, sein Druck ergibt sich als der Unterschied des gleichzeitig beobachteten Barometerstandes und der Höhe der in dem Barometerrohr noch stehen gebliebenen Quecksilbersäule. Man kennt also alles, was nötig ist, um das Gewicht des Dampfes mit demjenigen eines gleichen Raumteils Luft von gleichem Druck und gleicher Temperatur zu vergleichen.

Für schwer verdampfbare Körper wandte Dumas (1826) das folgende Verfahren an. Eine Glaskugel, welche zu einer Spitze mit feiner Öffnung ausgezogen ist, wird zuerst mit Luft gefüllt gewogen, dann eine kleine Menge des zu untersuchenden Stoffes hineingebracht und nun in einem mit Wasser, Öl oder einem geschmolzenen Metall gefüllten Bad bis zu einer bekannten, den Siedepunkt der Substanz übersteigenden Temperatur erhitzt. Die Substanz verdampft, ihr Dampf vertreibt die Luft, und schliesslich ist die Kugel, nachdem alle Flüssigkeit in Dampf verwandelt ist, nur noch mit überhitztem Dampf gefüllt, dessen Druck gleich dem äußeren Luftdruck ist und daher am Barometer abgelesen werden kann. Nun wird die Spitze zugeschmolzen und die mit Dampf gefüllte Glaskugel abermals gewogen. Dann bricht man die Spitze unter Wasser ab, durch den Luftdruck füllt sich die Kugel mit Wasser, und eine nochmalige Wägung ergibt ihren Rauminhalt, denn so viele Gramm das sie erfüllende Wasser wiegt, so viele Kubikcentimeter hält sie. Das Gewicht des Dampfes findet man, wenn man vom Gewicht der mit Dampf gefüllten Kugel das Gewicht der luftleeren Kugel abzieht; das letztere aber findet man, wenn man das anfänglich bestimmte Gewicht der mit Luft gefüllten Kugel um das leicht zu berechnende Gewicht der in ihr enthalten gewesenen Luft vermindert. Man kennt also wie vorhin Gewicht und Rauminhalt, Druck und Temperatur des untersuchten Dampfes.

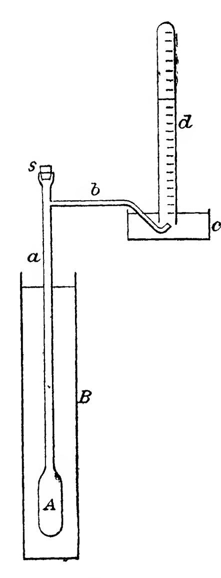


Fig. 114.
Dampfdichtebestimmung.

Nach dem Verdrängungsverfahren von Victor Meyer (1879) wird das unten erweiterte, oben in eine mit einem Stöpsel *s* (Fig. 114) verschlossene Röhre *a* auslaufende Gefäſs *A* durch Dämpfe von siedendem Wasser oder Anilin, die man in das umgebende Gefäſs *B* strömen läſst, auf eine Temperatur gebracht, welche die Siedetemperatur der zu untersuchenden Flüssigkeit übersteigt. Sobald keine Luft mehr aus dem seitlichen Rohr *b* nach der mit Wasser gefüllten pneumatischen Wanne *c* entweicht, öffnet man den Stöpsel *s*, wirft das kleine verschlossene Fläschchen mit der gewogenen Flüssigkeitsmenge in das Gefäſs *A*, schlieſst den Stöpsel *s* sofort wieder und schiebt das mit Wasser gefüllte graduirte Auffangrohr *d* über die Mündung des Seitenrohrs *b*. Das kleine Fläschchen öffnet sich, und der überhitzte Dampf der Flüssigkeit verdrängt ein ihm an Rauminhalt gleiches Luftvolumen, das in dem Rohre *d* aufgefangen und gemessen wird.

In der folgenden Tabelle sind die spezifischen Gewichte oder Dichten einiger Gase und Dämpfe angegeben.

| | Dichte bezogen auf: Luft = 1 | Wasserstoff = 2 |
|---|---|---|
| Schwefel | 2,211 | 64 |
| Jod | 8,71 | 254 |
| Brom | 5,54 | 160 |
| Phosphor | 4,388 | 124 |
| Quecksilber | 6,976 | 200 |
| Wasser | 0,622 | 18 |
| Alkohol | 1,613 | 46 |
| Äther | 2,565 | 74 |
| Essigsäure | 2,08 | 60 |
| Chloroform | 4,20 | 119,5 |
| Benzol | 2,75 | 78 |

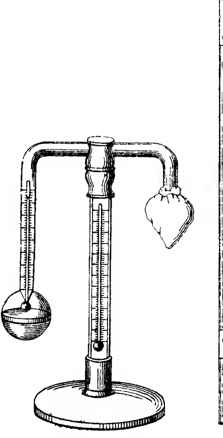
Diese Zahlen bestätigen nochmals das für die Gase bereits dargelegte Gesetz (89), daſs die Dichten der Stoffe in gasförmigem Zustande sich verhalten wie ihre Molekulargewichte. Miſst man daher Dampfdichte und Molekulargewicht nach derselben Einheit, indem man die Dichte des Wasserstoffes, dessen Molekulargewicht = 2 angenommen wurde (48), ebenfalls = 2 setzt (wie in der zweiten Zahlenkolumne vorstehender Tabelle geschehen ist), so ist die Dampfdichte gleich dem Molekulargewicht. Die Bestimmung der Dampfdichte einer chemischen Verbindung führt also unmittelbar zur Kenntnis ihres Molekulargewichts.

121. **Feuchtigkeit der Luft** nennt man den der atmosphärischen Luft als unsichtbares Gas beigemischten Wasserdampf. Infolge der an der Oberfläche des Meeres, der Seen etc. unausgesetzt vor sich gehenden Verdampfung enthält die Luft stets Wasserdampf in wechselnden Mengen, welcher bei den Witterungsvorgängen eine höchst wichtige Rolle spielt, weshalb es zu deren Beurteilung von groſsem Belang ist, den Betrag der jeweils vorhandenen Dampfmenge zu kennen. Der in der Luft enthaltene Wasserdampf übt vermöge seiner Spannkraft einen Druck aus, welcher sich zu dem Druck der (vollkommen trocken gedachten) Luft hinzufügt (Daltonsches Gesetz); die Quecksilbersäule des Barometers gibt daher nie den Druck der Luft allein, sondern den Gesamtdruck der Luft und des Dampfes an. Dieser Dampfdruck, in Millimetern Quecksilber ausgedrückt, oder auch die hieraus mittels der bekannten Dichte (0,622) des Wasserdampfes leicht zu berechnende Gewichtsmenge des in einem Kubikmeter Luft gasförmig enthaltenen Wassers heiſst die absolute Feuchtigkeit. Zur Beurteilung der Witterungsverhältnisse kommt es aber weniger darauf an, den absoluten Gehalt der Luft an Wasserdampf zu kennen, als zu wissen, ob die Luft ihrem Sättigungspunkt nahe oder weit davon entfernt ist; im ersteren Fall nennen wir sie feucht, im letzteren trocken. Wenn nämlich nahezu mit Wasserdampf gesättigte Luft eine nur geringe Abkühlung erfährt, so wird sich ein Teil ihres Dampfes in Form von Nebeln und Wolken verdichten oder mit unserer Haut in Berührung das Gefühl der Nässe hervorrufen; Luft dagegen, welche viel weniger Dampf enthält, als sie vermöge ihrer Temperatur bis zur Sättigung

aufnehmen könnte, wird eine beträchtliche Abkühlung ertragen, ohne dafs sich Wasser in flüssiger Form aus ihr niederschlägt. Vergleichen wir z. B. gesättigte Luft von 20° mit gesättigter Luft von 9°; die Spannkraft des in jener enthaltenen Dampfes beträgt 17,4 mm (113), in dieser dagegen nur 8,5 mm; beide Luftmengen sind feucht. Enthielte aber die erste Luftmenge bei derselben Temperatur von 20° nur Dampf von 8,7 mm Spannkraft, d. h. nur die Hälfte der Dampfmenge, welche sie vermöge ihrer Temperatur zu fassen im stande ist, so müfste sie trocken genannt werden, obgleich sie absolut genommen mehr Feuchtigkeit enthält als die gesättigte und darum feuchte Luft von 9°. Man nennt relative Feuchtigkeit oder Sättigungsverhältnis das Verhältnis des in der Luft wirklich vorhandenen Dampfgehalts zu dem, welcher bei der herrschenden Temperatur bis zur Sättigung enthalten sein könnte. Die relative Feuchtigkeit wird gewöhnlich in Prozenten ausgedrückt; für Luft von 20° und 8,7 mm Dampfspannung beträgt sie 50 Prozent, für gesättigte Luft 100 Prozent. Zur Ermittelung der absoluten sowohl als der relativen Feuchtigkeit dienen die Hygrometer und das Psychrometer.

Bringt man eine mit kaltem Wasser gefüllte Flasche in ein warmes Zimmer, so beschlägt sich ihre Aufsenwand mit feinen Wassertröpfchen. Die Luft im Zimmer enthält nämlich gasförmigen Wasserdampf, ist aber für ihre Temperatur nicht damit gesättigt. In Berührung mit der kalten Gefäfswand wird sie zuerst auf diejenige Temperatur gebracht, bei welcher der bereits vorhandene Wasserdampf zu ihrer Sättigung hinreicht und die geringste weitere Abkühlung genügt, um das Wasser in flüssiger Form niederzuschlagen. Diese Temperatur, bei welcher aus nicht gesättigter Luft der Wasserdampf sich auszuscheiden beginnt, heifst der Taupunkt. Durch Bestimmung des Taupunktes läfst sich nun der Feuchtigkeitsgehalt der Luft ermitteln. Gesetzt, man hätte gefunden, dafs in Luft von 20° der Beschlag sich zu zeigen beginnt bei 15°, so weifs man, dafs bei dieser Temperatur die Luft mit dem in ihr vorhandenen Wasserdampf gesättigt sein würde; die Spannkraft des Dampfes mufs demnach (113) 12,7 mm Quecksilber betragen. Wäre aber die Luft bei 20° gesättigt, so würde sie von Dampf 17,4 mm Spannkraft enthalten. Das Verhältnis der wirklich vorhandenen Dampfmenge zu der, welche die Luft vermöge ihrer Temperatur aufzunehmen fähig wäre, d. h. ihr Sättigungsverhältnis oder ihre „relative Feuchtigkeit“ ist daher 12,7 : 17,4 oder 73 : 100. Die Luft enthält also 73 Prozent von dem überhaupt möglichen Wassergehalt. Um den Taupunkt zu ermitteln, dient das in Fig. 115 dargestellte Daniellsche Hygrometer (Kondensationshygrometer). Eine weite Glasröhre ist zweimal umgebogen und an den Enden der senkrecht herabgehenden Schenkel, von denen der eine kürzer ist, mit Kugeln versehen. Die Röhre ist luftleer gemacht und enthält in der Kugel des längeren Schenkels eine leicht verdampfbare Flüssigkeit, Äther, dessen Dämpfe

die ganze Röhre erfüllen. In den Äther taucht ein Thermometer, während ein zweites Thermometer zum Ablesen der Lufttemperatur an dem Gestell des Apparats befestigt ist. Die andere Kugel ist mit einer Hülle von Musselin umkleidet; tröpfelt man Äther darauf, so verdampft derselbe, bindet Wärme und kühlt dadurch die Kugel ab; dadurch wird die Spannkraft des in ihr und der Röhre enthaltenen Ätherdampfes so verringert, dafs der in der ersten Kugel enthaltene Äther lebhaft zu verdampfen beginnt und vermöge des hierzu nötigen Wärmeverbrauches die Kugel abkühlt. Man gibt nun acht, bei welcher Temperatur des inneren Thermometers die Kugel sich beschlägt; um den zarten, hanchartigen Beschlag deutlich wahrnehmen zu können, ist ein Gürtel rings um die Kugel vergoldet. So erfährt man die Temperatur des Taupunktes und kann aus ihr und der Angabe des äufseren Thermometers, wie in obigem Beispiel, den Feuchtigkeitsgehalt der Luft ermitteln.



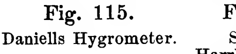

Fig. 115. Daniells Hygrometer.

Fig. 116. Saussures Harrhygrometer.

Viele Körper aus dem Tier- und Pflanzenreich, namentlich solche von faserigem Bau, wie Haare, Fischbein, Darmsaiten, Grannen etc., besitzen die Eigenschaft, das in der Luft gasförmig enthaltene Wasser in sich einzuschlucken (zu „absorbiren“) und sich dabei zu verlängern; in trockener Luft verlieren sie die absorbirte Feuchtigkeit wieder und verkürzen sich. Auf dieses Verhalten ist das Saussuresche (1783) Haarhygrometer (Fig. 116) gegründet. Ein von Fett befreites Menschenhaar, durch ein kleines Gewicht gespannt gehalten, überträgt seine durch die wechselnde Feuchtigkeit hervorgebrachten Längenänderungen mittels einer Rolle auf einen Zeiger, welcher leichtbeweglich auf einem geteilten Gradbogen spielt. Bringt man das Instrument unter eine mit trockener Luft gefüllte Glasglocke, so stellt sich der Zeiger auf den Punkt der vollkommenen Trockenheit ein, den man mit Null bezeichnet. Mit 100 bezeichnet man den Punkt, auf welchen der Zeiger weist in mit Wasserdampf gesättigter Luft, deren relative Feuchtigkeit 100 Prozent beträgt. Der Zwischenraum dieser beiden Teilstriche wird in 100 gleiche Teile, „Feuchtigkeits-Grad“, geteilt. Die Angaben des Instrumentes sind jedoch keineswegs gleichbedeutend mit der relativen Feuchtigkeit. Die neueren Instrumente dieser Art (nach Koppe), welche auf meteorologischen Stationen in Gebrauch sind, haben daher nicht eine in 100 gleiche Teile geteilte, sondern eine empirisch, durch Ver-

gleichung mit einem Taupunkts-Hygrometer geaichte Skala, die unmittelbar die relative Feuchtigkeit in Prozenten abzulesen gestattet.

Auf demselben Prinzip beruhen die Feuchtigkeitsanzeiger (Hygroskope), welche in den verschiedensten Formen unter dem Volk verbreitet und als Wetterpropheten geschätzt sind. Die Figuren in den Wetterhäuschen werden durch eine Darmsaite in Bewegung gesetzt. Ein geschälter Fichtenzweig, mit dem dickeren Ende an eine Mauer befestigt, zeigt durch stärkere oder schwächere Krümmung ebenfalls die Änderungen der Luftfeuchtigkeit an. Auch die schraubenförmig gewundenen Grannen mancher Geraniumarten, welche sich in feuchter Luft aufrollen, können als Hygroskope dienen.

Mittels des Psychrometers von August (1829) wird der Feuchtigkeitsgehalt der Luft durch Beobachtung der bei der Verdunstung eintretenden Abkühlung bestimmt. Dasselbe besteht aus zwei an gemeinschaftlichem Gestell befestigten Thermometern, deren Skalen noch Zehntelgrade abzulesen gestatten. Das eine gibt die Lufttemperatur an; die Kugel des anderen ist mit einem Musselinläppchen umhüllt, welches aus einem Wassergefäſs durch einen Docht stets feucht erhalten wird. Indem das Wasser von der Musselinhülle verdunstet, verbraucht es Wärme, die es dem Thermometer entzieht; das feuchte Thermometer wird daher einen tieferen Stand zeigen als das trockene, und zwar einen um so tieferen, je lebhafter die Verdunstung vor sich geht, d. h. je trockener die umgebende Luft ist. Der Unterschied der Angaben des trockenen und des befeuchteten Thermometers steht sonach in einem gesetzmäſsigen Zusammenhang mit dem Feuchtigkeitsgrad der Luft, und dieser letztere kann aus jenem Unterschied berechnet werden. Aus der Temperatur des trockenen Thermometers und der psychrometrischen Differenz erfährt man sowohl die absolute Feuchtigkeit, d. h. den in Millimetern Quecksilber gemessenen Dampfdruck, als auch die relative Feuchtigkeit.

122. **Verflüssigung der Gase.** Ungesättigte Dämpfe verhalten sich bei Änderungen ihres Rauminhalts und ihrer Temperatur wie Luft; sie gehorchen dem Mariotte-Gay-Lussacschen Gesetz. Ihr Zustand ist daher von demjenigen der gewöhnlich so genannten Gase nicht wesentlich verschieden. Die Gase sind in der That nichts anderes als ungesättigte oder überhitzte Dämpfe, welche sehr weit von ihrem Sättigungspunkt entfernt sind, Dämpfe, welche aus Flüssigkeiten entstanden sind, deren Siedepunkt sehr tief liegt. Die Gase können daher wie ungesättigte Dämpfe durch Abkühlung oder Zusammendrücken zunächst in gesättigte Dämpfe und diese durch weiteres Abkühlen oder Zusammenpressen zu Flüssigkeiten verdichtet werden. Wird z. B. schweflige Säure, jenes stechend riechende Gas, das sich bei der Verbrennung des Schwefels entwickelt, durch eine Kältemischung aus Schnee und Kochsalz abgekühlt, so verdichtet es sich zu einer farblosen Flüssigkeit, welche schon bei 10⁰ unter Null siedet (s. o. Tabelle, 114). Zur Zusammendrückung der leichter verdichtbaren Gase kann man sich des Örstedschen Kom-

pressionsapparats (vgl. S. 107) bedienen, eines mit luftfreiem Wasser gefüllten starkwandigen Glascylinders *c c* (Fig. 117), in welchen mittels einer Druckpumpe *d* Wasser aus einem seitlichen Behälter hineingepreſst wird. Auf dem Boden des Glascylinders steht ein Gefäſs mit Quecksilber, in welches unten offene, oben zugeschmolzene Glasröhren tauchen, welche bei gewöhnlichem Druck mit den Gasen bis zur Quecksilberoberfläche angefüllt sind. Pumpt man Wasser in den Cylinder, so steigt das Quecksilber in den Röhren, und die Gase werden zusammengedrückt, wobei ihr Druck zuerst nach dem Mariotteschen Gesetz zunimmt. Man erkennt dies an einer in das Quecksilbergefäſs gleichzeitig eingesetzten, mit gewöhnlicher Luft gefüllten Röhre, welche als geschlossenes Manometer zur Messung des jeweils im Glascylinder herrschenden Drucks dient. Nähert sich ein Gas seinem Sättigungspunkt, so verringert sich sein Rauminhalt schneller als derjenige der Luft; man sieht das Quecksilber in der betreffenden Röhre rascher steigen, und über seiner Kuppe erscheint die Flüssigkeit. So werden bei $0^0$ Cyan und schweflige Säure bei einem Druck von 3 Atmosphären, Chlor bei 4, Ammoniak bei $6^1/_2$ Atmosphären flüssig. Schwerer verdichtbare Gase werden flüssig gemacht, indem man sie mittels einer Kompressionspumpe (Natterers Kompressionsapparat) in eine starke, mit Ventil versehene eiserne Flasche preſst und gleichzeitig stark abkühlt. Kohlensäure (Kohlendioxyd) wird auf diese Weise bei 38, Stickstoffoxydul bei 50 Atmosphären flüssig. Die flüssige Kohlensäure ist eine farblose, leicht bewegliche Flüssigkeit vom spezifischen Gewicht 0,86 bei $15^0$; sie dehnt sich beim Erwärmen stärker aus als Luft.

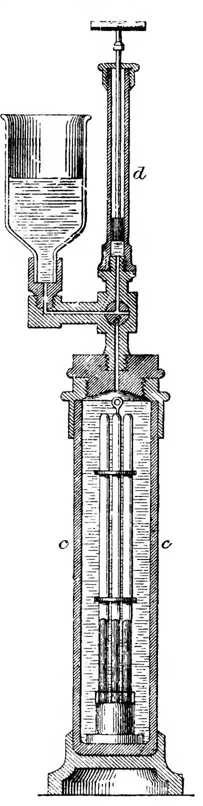


Fig. 117.
Kompressionsapparat.

Durch Verdampfung der so erhaltenen Flüssigkeiten lassen sich infolge des groſsen Wärmeverbrauchs sehr niedrige Temperaturen erzielen.

Läſst man flüssige Kohlensäure aus der Eisenflasche, in welcher sie aufbewahrt wird, in einen Tuchbeutel ausströmen, so wird durch die rasche Verdunstung eines Teils derselben eine solche Kälte erzeugt, daſs die noch übrige Menge zu einer schneeähnlichen Masse erstarrt. Ungeachtet der niedrigen Temperatur dieses Kohlensäureschnees (seine Temperatur beträgt — $79^0$) kann man denselben ohne Gefahr in die Hand nehmen, weil eine sofort sich bildende Dampfschicht die unmittelbare Berührung mit der Haut hindert; erst beim Drücken empfindet man brennendes Schmerzgefühl. In Äther löst

sich die feste Kohlensäure auf. Man benutzt diese Lösung, besser als den Kohlensäureschnee, zur Abkühlung auf — 79°; z. B. um zu zeigen, dafs Quecksilber bei dieser Temperatur fest ist. Durch Absaugen der Dämpfe mittels der Luftpumpe kann man die Temperatur dieser Lösung auf — 110° C. erniedrigen. Flüssiges Stickstoffoxydul erstarrt durch seine Verdunstung zu einer Masse, deren Schmelzpunkt bei — 105° C. liegt.

Flüssige schweflige Säure bildet in einem glühenden Platintiegel einen Leidenfrostschen Tropfen; giefst man Wasser hinzu, so verdampft sie stürmisch und das Wasser gefriert im glühenden Tiegel. Durch das Gemisch von Äther und fester Kohlensäure kann man sogar Quecksilber im glühenden Tiegel zum Erstarren bringen.

Während die meisten bekannten Gase sich durch Druck und Abkühlung in den flüssigen Zustand hatten überführen lassen, hatten einige wenige Gase, nämlich Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff, und daher auch die aus den beiden letzteren gemischte atmosphärische Luft, ferner Kohlenoxyd und Stiffstoffoxyd, bis in die neuere Zeit allen dahin gerichteten Bemühungen widerstanden und daher den Namen der permanenten („beständigen“) Gase erhalten, im Gegensatz zu jenen koërcibeln („bezwingbaren“) Gasen; Colladon hatte dieselben bei — 30° C. auf 400 Atmosphären, Natterer sogar bis zu 3000 Atmosphären zusammengeprefst, ohne Verflüssigung zu erzielen. Nun hat Andrews (1869) gezeigt, dafs es für jeden Dampf eine sogenannte „kritische Temperatur“ gibt, oberhalb welcher der Dampf bei noch so grofsem Druck gasförmig bleibt, indem ein Maximum der Spannkraft oder der Sättigungszustand nicht zu erreichen ist.

Wenn man ein starkwandiges zugeschmolzenes Glasrohr, das mit flüssiger und dampfförmiger Kohlensäure in passendem Mengenverhältnis gefüllt ist, vorsichtig erwärmt, so verschwindet, sobald die Temperatur 31° erreicht hat, der Meniskus, der die Flüssigkeit gegen den Dampfraum bis dahin abgrenzte und der Inhalt des Rohrs bildet oberhalb dieser Temperatur ein gleichförmiges Ganzes. Kühlt man wieder ab, so tritt bei 31° Nebel in dem Rohre auf, aus dem die Flüssigkeit mit scharfer Abgrenzung gegen den Dampf wieder zusammenrinnt. Für Kohlensäure ist also 31° die kritische Temperatur. Unterhalb dieses Punktes besitzt der Kohlensäuredampf für jede Temperatur einen bestimmten Sättigungsdruck, unter dem er sich verflüssigen läfst; bei 0° z. B. unter 38, bei 15° unter 52 Atmosphären. Wie bei allen Dämpfen steigt dieser Sättigungsdruck mit der Temperatur; seinen Wert bei der kritischen Temperatur nennt man den kritischen Druck. Er beträgt für Kohlensäure 77 Atmosphären. Für Äthylen ist die kritische Temperatur 9° bei 58 Atmosphären kritischen Druckes, für Äther 196° bei 36 Atmosphären.

Nach diesen Erfahrungen war es wahrscheinlich, dafs die Versuche Colladons und Natterers deswegen zu keiner Verflüssigung der permanenten Gase geführt hatten, weil die Temperatur bei diesen

Versuchen noch über der kritischen Temperatur gelegen hatte. Damit die Verflüssigung auch dieser Gase beginnen kann, mufs man also neben starkem Druck noch eine möglichst tiefe Erkaltung einwirken lassen.

Indem Cailletet in Paris und Pictet in Genf diese Bedingung erfüllten, gelang es ihnen fast gleichzeitig gegen Ende des Jahres 1877, die bis dahin sogenannten „permanenten“ Gase flüssig zu machen. Cailletet komprimirte in einer engen, dickwandigen Röhre Sauerstoffgas bis zu 300 Atmosphären und kühlte es gleichzeitig mit flüssiger schwefliger Säure auf — 29° C. ab. Es war in diesem Zustande noch gasförmig; liefs man aber durch rasches Öffnen eines Hahnes einen Teil des Gases in die Luft entweichen, so bewirkte die plötzliche Entspannung ein weiteres starkes Sinken der Temperatur bis zur Verflüssigung des Gases, die nun in Gestalt eines in

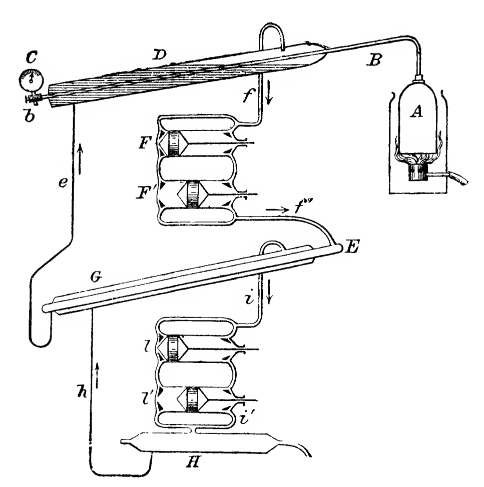



Fig. 118.
Pictets Apparat zur Verflüssigung der sogen. permanenten Gase.

der Röhre entstehenden Nebels eintrat. Ähnliche Erscheinungen zeigten Stickstoff, Kohlenoxyd, atmosphärische Luft und selbst Wasserstoff. Während Cailletet die genannten Gase nur als zarte Nebel bei plötzlicher Ausdehnung nach starker Zusammenpressung (dynamische Kondensation) auftreten sah, gelang es Pictet, durch hohen Druck und starke Abkühlung (statische Kondensation) gröfsere Mengen flüssigen Sauerstoffs und Wasserstoffs zu erhalten. Das Verfahren, dessen er sich bediente, wird durch die Skizze Fig. 118 erläutert. Um die erforderliche tiefe Temperatur zu erzielen, umgab Pictet das Rohr, in dem der Sauerstoff zusammengedrückt wurde, ein starkwandiges, 3,70 m langes Kupferrohr *B*, mit einem Mantel *D*, in dem flüssige Kohlensäure sich befand; ihre Dämpfe wurden durch die Pumpen *F*, *F'* rasch und andauernd abgesaugt, so dafs die

Kohlensäure durch schnelle Verdunstung unter —100° sich abkühlte. Die Dämpfe der Kohlensäure wurden in dem Rohr *E* wieder verflüssigt und durch *e* nach *D* zurückgedrückt. Um die Erwärmung der Kohlensäure bei der Verflüssigung zu verhüten, wurde die Kohlensäure in *E* ihrerseits wieder mit Hülfe einer gleichen Anordnung auf einer Temperatur von —50 bis —60° gehalten, indem mittels der Pumpen *l, l'* schweflige Säure in dem Mantel *G* zum Verdampfen und in *H* zur Kondensation gebracht wurde. Die Kühlung in *H* erfolgte durch einen Strom kalten Wassers. In dem Rohr *B* verdichtete sich der Sauerstoff, der in dem starkwandigen eisernen Gefäfs *A* durch Erhitzen von chlorsaurem Kalium entwickelt wurde, unter wachsendem Druck und ward schliefslich flüssig, was daran erkannt wurde, dafs das Manometer *C* einen festen Stand annahm. Beim Öffnen des Hahns *b* entwich alsdann mit grofser Heftigkeit ein Strahl flüssigen Sauerstoffs. In gröfserem Mafsstabe und mit genaueren Messungen haben dann v. Wroblewski, Olszewski, Dewar u. a. die Gase verflüssigt. Dabei ist es schliefslich Dewar gelungen, sogar den Wasserstoff nicht blofs zu einer klaren, farblosen Flüssigkeit zu verdichten, sondern ihn sogar zu einer glasartigen Masse erstarren zu lassen. Noch schwerer zu verdichten als Wasserstoff ist Helium. Die folgende Tabelle enthält die kritischen Temperaturen und Drucke, die normalen Siedepunkte und die Erstarrungspunkte der wichtigeren Gase.

| | Kritische Temperatur | Kritischer Druck | Normaler Siedepunkt | Erstarrungspunkt |
|---|---|---|---|---|
| Wasserstoff . . . | —223° | 15 Atm. | —252,5° | ca. —257° |
| Stickstoff . . . . | —146 | 35 „ | —194 | —214 |
| Sauerstoff . . . . | —119 | 51 „ | —182,5 | — |
| Argon . . . . . | —121 | 51 „ | —187 | —190 |
| Kohlenoxyd . . . | —140 | 36 „ | —190 | —207 |
| Stickstoffoxyd . . | — 94 | 71 „ | —154 | —167 |

Die Dichte des flüssigen Wasserstoffs beim Siedepunkt ist 0,07, die des Stickstoffs 0,88, die des Sauerstoffs 1,13.

Die tiefen Temperaturen, die zu diesen Versuchen erforderlich waren, wurden von den genannten Forschern stets nach dem Pictetschen Prinzip erreicht, indem sie eine Reihe von Substanzen mit immer tiefer liegenden kritischen Punkten nacheinander anwendeten und durch Kondensation derselben bei hohem Druck und darauffolgendem Verdampfen bei niedrigem Druck stufenweise zu immer tieferen Temperaturen fortschritten. Ein einfacheres Verfahren, das gestattet, ein Gas für sich allein zu verflüssigen, hat Linde (1896) angegeben. Es beruht auf der Thatsache, dafs die Temperatur eines zusammengeprefsten Gases, wenn es sich ohne äufsere Arbeitsleistung ausdehnt, ein wenig sinkt, und zwar um so mehr, je gröfser sein Überdruck und je tiefer seine Temperatur ist. Die durch die Kompressions-

pumpe (Fig. 119) beim Hinaufgang des Kolbens aus dem Sammelgefäſs angesaugte Luft wird beim Niedergang auf etwa 50 Atmosphären zusammengepreſst, gibt beim Durchgang durch den Kühler die bei der Kompression erzeugte Wärme ab und strömt durch die Röhre $t_1 t_2$ durch das sich öffnende Regulirventil unter Abkühlung in das Sammelgefäſs. Diese Röhre ist von einem weiteren Rohr umschlossen, daſs durch die Röhre $P$ mit dem Sammelgefäſs in Verbindung steht. Beim nächsten Kolbenhub strömt die bereits abgekühlte Luft aus dem Sammelgefäſs durch das Umhüllungsrohr des „Gegenstromapparates“ und das Rohr $t_3$ nach dem Kompressor, und

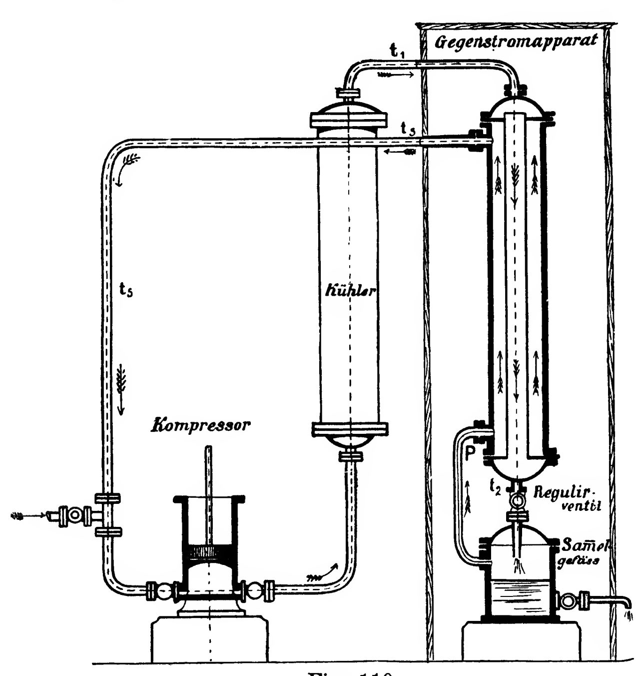



Fig. 119.
Lindes Apparat zur Verflüssigung der Luft.

kühlt dabei die durch $t_1 t_2$ zuströmende Luft noch mehr ab. Durch dieses sinnreiche Verfahren wird die durch die Pumpe in dauerndem Kreislauf erhaltene Luft, indem sich die durch Ausströmung bewirkten Temperaturerniedrigungen summiren, immer tiefer abgekühlt, bis sie bei $-191^0$ unter gewöhnlichem Atmosphärendruck flüssig wird und aus dem Sammelgefäſs in andere Gefäſse abgelassen werden kann. Die so gewonnene flüssige Luft ist viel reicher an Sauerstoff als die atmosphärische; sie enthält etwa 2 Teile Sauerstoff auf 1 Teil Stickstoff, weil der Stickstoff schwieriger flüssig wird und leichter verdampft als der Sauerstoff.

Die kritische Temperatur, bei welcher eine Flüssigkeit unter

jedem beliebigen Druck in den gasförmigen Zustand übergeht, wird (nach Mendelejeff) auch der absolute Siedepunkt genannt. Auch könnte man die Begriffe „Dampf" und „Gas" mit Rücksicht auf den kritischen Punkt so abgrenzen, daſs man einen luftförmigen Körper bei jeder Temperatur unter seinem kritischen Punkt „Dampf" nennt, darüber aber „Gas". Nach dieser Definition kann ein Dampf durch Druck allein, ein Gas nur bei gleichzeitiger Abkühlung verflüssigt werden.

123. **Graphische Darstellung des Verhaltens der Gase und Dämpfe.** Das Mariotte-Gay-Lussacsche Gesetz, welchem die vollkommenen Gase gehorchen, läſst sich in folgender Weise durch eine Zeichnung veranschaulichen. Wir denken uns das Gas in einer horizontalen cylindrischen Röhre, die bei $O$ (Fig. 120 a) fest verschlossen ist, durch einen beweglichen Kolben $K$ abgegrenzt. Ist der Kolben bis zu einer beliebigen Stelle $V$ gegen $O$ hin vorgeschoben, so stellt die Strecke (Abscisse) $OV = v$ das Volumen $v$ des Gases vor; bei einer bestimmten absoluten Temperatur $T$ ergibt sich der zugehörige Druck $p$ des Gases aus der Gleichung $pv = RT$ (105). Errichtet

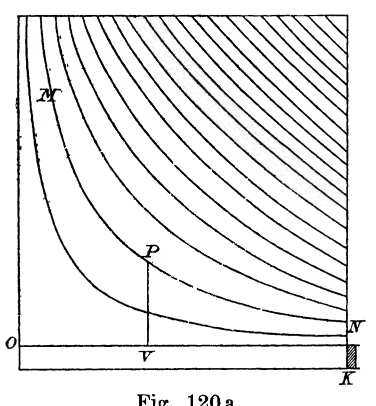


Fig. 120 a.
Verhalten der Gase.

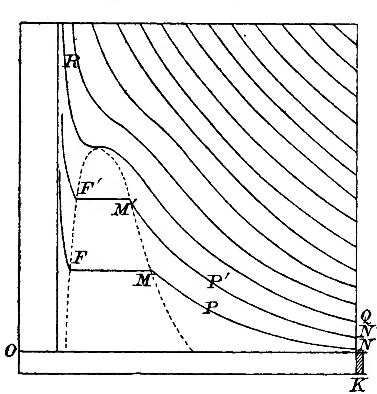


Fig. 120 b.
Verhalten der Dämpfe.

man nun auf $OV$ in $V$ die Senkrechte (Ordinate) $VP$ und macht sie gleich $p$ nämlich gleich der Höhe der entsprechenden Quecksilbersäule, verfährt man dann ebenso, unter Festhaltung desselben Wertes von $T$, für alle anderen Stellungen des Kolbens, d. i. für alle möglichen Werte des Volumens $v$, so bilden die Gipfelpunkte der Ordinaten eine stetige krumme Linie $NPM$ (eine gleichseitige Hyperbel), welche durch ihr Ansteigen von rechts nach links die Zunahme des Drucks bei Abnahme des Volumens versinnlicht. Wiederholt man diese Konstruktion für andere Temperaturen, so erhält man eine Schar solcher krummer Linien, welche die ganze Zeichnungsebene bedecken, und, weil jede derselben einer und derselben Temperatur entspricht, „Isothermen" genannt werden.

Denken wir uns ferner die Röhre mit ungesättigtem Dampf gefüllt, so wird beim Hineindrücken des Kolbens zuerst der Druck des Dampfes nach der Kurve $NPM$ (Fig. 120 b) steigen, bis bei $M$ das Maximum der Spannkraft oder der Sättigungszustand erreicht ist. Von nun an wächst bei weiterer Verkleinerung des Volumens der Druck nicht mehr, sondern es tritt teilweise Verflüssigung des Dampfes ein; die Kurve geht daher von $M$ bis $F$ als horizontale gerade Linie weiter, bis bei $F$ aller Dampf in Flüssigkeit verwandelt

ist. Von hier an ändert sich wegen der geringen Zusammendrückbarkeit der Flüssigkeit das Volumen trotz bedeutender Drucksteigerung nicht mehr merklich, und die den Druck anzeigende Linie steigt plötzlich steil empor. Bei höherer Temperatur wird die Sättigung erst bei höherem Druck und kleinerem Volumen erreicht, wie die Kurve $N' P' M' F'$ veranschaulicht. Bei der kritischen Temperatur wird die Druckänderung durch die krumme Linie $QR$ dargestellt, welche kein horizontales Stück mehr aufweist und dadurch zu erkennen gibt, dafs ein Maximum der Spannkraft oder eine Sättigung des Dampfes nun nicht mehr eintritt. Bei noch höherer Temperatur ist der Verlauf der Isothermen derselbe, wie bei den vollkommenen Gasen. Die der kritischen Temperatur entsprechende Kurve $QR$ bildet in der Zeichnungsebene die Grenze zwischen dem unter ihr liegenden Gebiet des Dampfzustandes und dem oberhalb liegenden Gebiet des Gaszustandes.

124. **Spezifische Wärme** nennt man die Wärmemenge, welche 1 Kilogramm eines Körpers bedarf, um sich um einen Grad (C.) zu erwärmen. Die Wärmemenge, welche notwendig ist, einen Körper um $1^0$ zu erwärmen, ist sonach gleich dem Produkte aus seinem Gewicht und seiner spezifischen Wärme, und heifst seine Wärmekapazität. Die Erfahrung lehrt, dafs gleiche Massen verschiedener Stoffe für die gleiche Temperaturerhöhung einen sehr ungleichen Aufwand von Wärme erfordern. Will man z. B. 1 kg Wasser und 1 kg Quecksilber von $0^0$ auf $100^0$ erwärmen, so bemerkt man, dafs bei gleicher Wärmezufuhr das Quecksilber viel rascher die gewünschte Temperatur erreicht als das Wasser. Ja sogar, wenn man von beiden Flüssigkeiten je 1 l nimmt, also dem Gewicht nach 13,6 mal soviel Quecksilber als Wasser, wird man bei jenem mit einer Heizflamme das Ziel schneller erreichen, als bei diesem mit zwei ebensolchen Flammen. Erkaltet ein warmer Körper wieder auf seine ursprüngliche Temperatur, so gibt er die Wärmemenge, welche er vorher zu seiner Erwärmung verbraucht hatte, an seine Umgebung wieder ab; man wird daher, indem man diese Wärmeabgabe beobachtet, zugleich den zur Erwärmung nötigen Wärmebedarf kennen lernen; alle Verfahrungsarten zur Ermittelung der spezifischen Wärme der Körper beruhen in der That auf der Bestimmung der beim Erkalten abgegebenen Wärmemenge. Erwärmen wir drei gleich schwere Kugeln von Kupfer, Zinn und Blei in siedendem Wasser auf $100^0$ und bringen sie rasch auf eine Waschscheibe, so fällt die Kupferkugel sehr bald durch das Loch, das sie aufgeschmolzen hat, die Zinnkugel dringt tief in die Scheibe ein, während die Bleikugel nur ganz wenig einsinkt. Es ist hierdurch augenfällig, dafs das Kupfer die gröfste Wärmemenge abgegeben hat und demnach unter diesen Metallen die gröfste spezifische Wärme besitzt, das Zinn eine mittlere, das Blei die kleinste. Genaueres über das Verhältnis der spezifischen Wärmen dieser Körper erfahren wir jedoch durch diesen Versuch nicht; hierzu wäre es notwendig, die abgegebenen Wärmemengen wirklich zu messen, d. h. in Wärmeeinheiten auszudrücken. Als Einheit der Wärmemenge oder Wärmeeinheit (Kalorie) wurde bereits (108) diejenige Wärmemenge festgesetzt, welche erforderlich ist, um 1 kg Wasser um $1^0$ zu erwärmen, oder, was dasselbe ist, man hat

die spezifische Wärme des Wassers = 1 angenommen. Vorrichtungen zur Messung von Wärmemengen nennt man Kalorimeter. Um die spezifische Wärme eines Körpers nach dem Schmelzverfahren zu bestimmen, kann das Eiskalorimeter (Fig. 121) von Lavoisier und Laplace dienen. Dasselbe besteht aus drei sich der Reihe nach umhüllenden Blechgefäſsen, von denen das innerste *c* siebartig durchlöchert oder auch durch einen Drahtkorb ersetzt ist. Der Zwischenraum *a a* zwischen dem äuſsersten und mittleren Gefäſs sowie der hohle Deckel des letzteren werden mit Eisstücken gefüllt, die dazu dienen, die Wärme der äuſseren Umgebung von dem Raum *b b* zwischen dem mittleren und innersten Gefäſs, der ebenfalls mit Eisstücken gefüllt ist, abzuhalten; das in dem Raum *a a* durch die äuſsere Wärme erzeugte Schmelzwasser flieſst durch den Hahn *d* ab.

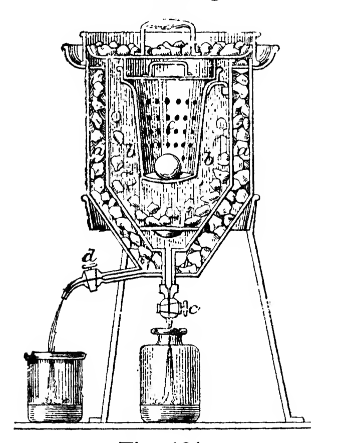



**Fig. 121.**
Eiskalorimeter von Lavoisier u. Laplace.

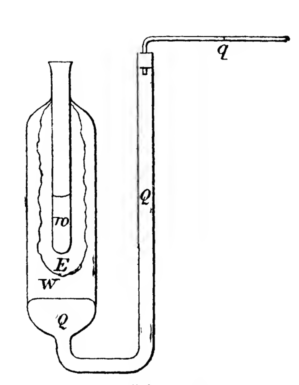



Fig. 122.
Eiskalorimeter von Bunsen.

Bringt man nun einen Körper von bekanntem Gewicht und bekannter Temperatur (z. B. eine in den Dämpfen siedenden Wassers auf 100° erhitzte eiserne Kugel) in das innerste Gefäſs, so wird derselbe, indem er von dieser Temperatur auf 0° erkaltet, eine gewisse Menge Eis schmelzen, welche man durch Wägung des durch den Hahn *e* abgelaufenen Schmelzwassers ermittelt. Da man nun weiſs, daſs zur Schmelzung von 1 kg Eis 80 Wärmeeinheiten erforderlich sind, so kann man leicht die Wärmemenge berechnen, welche jener Körper bei seinem Erkalten abgegeben hat, und erfährt sonach auch die Wärmemenge, welche derselbe für 1 kg und für 1° C. enthielt, d. h. seine spezifische Wärme. Viel einfacher ist das Verfahren von Black (1772); man bringt den erwärmten Körper in eine Vertiefung eines oben ebenen Eisblocks und deckt mit einer Eisplatte zu, und wägt, nachdem der Körper auf 0° erkaltet ist, das mittels eines Schwämmchens aufgetupfte Schmelzwasser. Das weit genauere Eiskalorimeter von Bunsen (Fig. 122) gründet sich auf die Thatsache, daſs beim

Schmelzen des Eises eine Zusammenziehung stattfindet, indem das entstandene Schmelzwasser einen kleineren Raum einnimmt als das Eis. In das weitere Glasgefäſs *W*, welches sich unten in das umgebogene und wieder aufsteigende Glasrohr *Q Q* fortsetzt, ist das Probirröhrchen *w* eingeschmolzen; das Gefäſs *W* wird mit luftfreiem Wasser gefüllt, welches durch das im unteren Teil von *W* und in der Röhre befindliche Quecksilber *Q Q* abgesperrt ist. Indem man tief erkalteten Weingeist durch das Probirröhrchen *w* strömen läſst, umkleidet sich dasselbe mit einer Eishülle. Wirft man nun einen auf bekannte Temperatur erwärmten Körper in das Proberöhrchen, welches ein wenig Wasser von 0° enthält, so wird etwas Eis geschmolzen, infolge der eintretenden Raumverminderung tritt mehr Quecksilber in das Gefäſs *W*, und in dem engen Glasröhrchen *q*, welches mittels eines Korkes in das Rohr *Q* eingesetzt ist, zieht sich der Quecksilberfaden zurück; aus der Gröſse seiner Verschiebung ergibt sich die Menge des entstandenen Schmelzwassers und demnach auch die von dem Körper an das Eis abgegebene Wärmemenge.

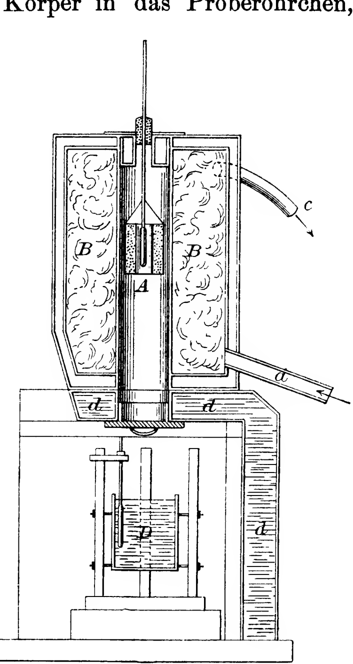


Fig. 123.
Wasserkalorimeter von Regnault.

Vermischt man 1 kg Wasser von 10° mit 1 kg Wasser von 50°, so zeigt die Mischung, wenn alle Wärmeverluste vermieden wurden, die mittlere Temperatur von 30°. Das eine Kilogramm Wasser gab nämlich, indem es von 50° auf 30° erkaltete, die 20 Wärmeeinheiten ab, welche notwendig waren, um das andere Kilogramm Wasser von 10° auf 30° zu erwärmen. Mischt man dagegen 1 kg Wasser von 10° mit 1 kg Terpentinöl von 60°, so zeigt das Gemisch nur etwa 24°. Um die 14 Wärmeeinheiten zu liefern, welche zur Erwärmung des einen Kilogramms Wasser von 10° auf 24° erforderlich waren, muſste also das Kilogramm Terpentinöl um 36° erkalten; umgekehrt werden diese 14 Wärmeeinheiten auch wieder hinreichen, um 1 kg Terpentinöl um 36° zu erwärmen. Zur Erwärmung von 1 kg Terpentinöl um 1° sind daher $^{14}/_{36}$ oder 0,4 Wärmeeinheiten erforderlich, oder 0,4 ist die spezifische Wärme des Terpentinöls. Um dieses Mischungsverfahren mit der erforderlichen Genauigkeit auszuführen, bediente sich Regnault (1840) der in Fig. 123 abgebildeten Vorrichtung. Der obere Teil wird von drei

einander umhüllenden Blechcylindern gebildet, deren innerster $A$ oben durch einen Kork, in welchem ein Thermometer steckt, unten durch einen leicht abnehmbaren Blechdeckel verschlossen ist. In der Mitte von $A$ hängt an einem durch den Kork gehenden Faden ein ringförmiges Drahtkörbchen, welches den zu untersuchenden Körper, entweder in Stücken oder in dünnwandige Glasröhrchen eingeschmolzen, aufnimmt und in seiner inneren Höhlung das Gefäfs des Thermometers einschliefst. In den Raum $B$ wird aus einem seitlich aufgestellten Dampfkessel durch die Röhre $a$ Wasserdampf eingeleitet, welcher den Körper auf 100° erwärmt und durch die Röhre $c$ wieder abströmt. Ist diese Temperatur erreicht, so wird nach Wegnahme des unteren Deckels das Drahtkörbchen in das mit einer gewogenen Wassermenge gefüllte Wasserkalorimeter $D$ herabgelassen und die Mischungstemperatur beobachtet, woraus sich die von dem Körper an das Wasser abgegebene Wärmemenge und sonach auch seine specifische Wärme leicht ableiten läfst. Durch eine mit kaltem Wasser angefüllte doppelte Blechwand $d$ ist das Kalorimeter $D$ vor Erwärmung von dem Dampfkessel und dem Dampfraum $BB$ her geschützt.

Ist $m$ das Gewicht des Wassers im Kalorimeter, $t$ seine Temperatur, $M$ das Gewicht des Körpers, $T$ dessen Temperatur, $c$ seine spezifische Wärme und $\vartheta$ die entstandene Mischungstemperatur, so hat der Körper die Wärmemenge $Mc(T-\vartheta)$ abgegeben, das Wasser die Wärmemenge $m(\vartheta-t)$ aufgenommen. Beide Wärmemengen sind einander gleich, also $Mc(T-\vartheta)=m(\vartheta-t)$, woraus sich ergibt:

$$c=\frac{m(\vartheta-t)}{M(T-\vartheta)}.$$

Bei genauen Bestimmungen mufs berücksichtigt werden, dafs auch das Kalorimeter selbst und das eingetauchte Thermometer Wärme in sich aufnehmen, und dafs während des Versuchs Wärmeverlust an die Umgebung stattfindet, Umstände, welche leicht in Rechnung gezogen werden können. Mischt man Wasser mit Wasser, so ist in der vorstehenden Gleichung $c=1$, und sie wird $M(T-\vartheta)=m(\vartheta-t)$, d. h. die Temperaturveränderungen verhalten sich umgekehrt wie die zugehörigen Mengen. Es ergibt sich daraus bei der Mischung zweier Massen von Wasser oder überhaupt von gleichartigem Stoff die Mischungstemperatur

$$\vartheta=\frac{MT+mt}{M+m}.$$

Man nennt diese Gleichung die Richmannsche Regel.

Ein drittes Verfahren zur Bestimmung der spezifischen Wärme, das besonders von Dulong und Petit angewendete Abkühlungsverfahren, gründet sich auf den Satz, dafs ein erwärmter Körper im luftleeren Raum, wo er nur durch Wärmestrahlung sich abkühlen kann, unter sonst gleichen äufseren Umständen um so langsamer erkaltet, eine je gröfsere Wärmemenge er enthält; bei gleicher Temperaturerniedrigung verhalten sich hiernach die von verschiedenen Körpern abgegebenen Wärmemengen wie die Abkühlungszeiten.

Die spezifischen Wärmen der Körper nehmen mit höherer Temperatur zu; zwischen 0° und 100° ist indessen die Änderung so

gering, dafs man die spezifische Wärme innerhalb dieser Grenzen als unveränderlich betrachten kann.

Die spezifischen Wärmen einiger fester Grundstoffe sind:

| | | | |
|---|---|---|---|
| Magnesium | 0,25 | Zinn | 0,054 |
| Aluminium | 0,22 | Jod | 0,054 |
| Eisen | 0,11 | Antimon | 0,050 |
| Zink | 0,094 | Quecksilber | 0,033 |
| Kupfer | 0,093 | Platin | 0,032 |
| Silber | 0,056 | Blei | 0,031 |

und diejenigen einiger Flüssigkeiten:

| | | | |
|---|---|---|---|
| Alkohol | 0,58 | Benzol | 0,39 |
| Glycerin | 0,58 | Chloroform | 0,23 |

Hiernach hat unter allen Körpern das Wasser die gröfste spezifische Wärme, nämlich 1. Die spezifische Wärme des Eises beträgt nur 0,505.

Dulong und Petit fanden (1819) bei Vergleichung der obigen Zahlen das wichtige Gesetz, dafs die spezifischen Wärmen der festen chemischen Elemente (Grundstoffe) sich umgekehrt verhalten wie ihre Atomgewichte, so dafs das Produkt aus Atomgewicht und spezifischer Wärme für alle diese Körper das nämliche und zwar nahezu gleich 6,4 ist. Das Dulong-Petitsche Gesetz läfst sich sonach auch folgendermafsen aussprechen: die durch die Atomgewichte ausgedrückten Mengen der festen Elemente bedürfen zu gleicher Temperaturerhöhung gleich grofser Wärmemengen, oder: die Atomwärmen der festen Grundstoffe sind gleich. Neumann (1831) wies ferner nach, dafs auch die spezifischen Wärmen chemischer Verbindungen von ähnlicher Zusammensetzung im umgekehrten Verhältnis der Molekulargewichte stehen und Joule (1844) stellte den Satz auf, dafs die Molekularwärme einer chemischen Verbindung gleich der Summe der Atomwärmen ihrer Elemente sei.

Um die spezifische Wärme von Gasen zu bestimmen, liefs Regnault das Gas in gleichmäfsigem Strom zuerst durch ein mit heifsem Öl umgebenes Schlangenrohr fliefsen, wo es sich auf die Temperatur $t$ erwärmte, sodann durch das Schlangenrohr eines mit Wasser gefüllten Kühlgefäfses, wo es sich wieder auf die Temperatur $t'$ abkühlte, wobei es in jeder Minute die Wärmemenge $mc(t-t')$ an das Kühlwasser abgeben mufste, wenn $m$ das Gewicht der per Minute durchgeflossenen Gasmenge und $c$ deren spezifische Wärme bezeichnet. Hat das Kühlwasser, dessen Masse $M$ sei, einen sich gleichbleibenden Temperaturüberschufs über die Umgebung erlangt, so beobachtet man nach Unterbrechung des Gasstromes, um wie viele Grade ($T$) sich das Wasser pro Minute abkühlt. Offenbar wurde vorhin, als der Gasstrom noch flofs, die jetzt entweichende Wärmemenge $MT$ durch die in der gleichen Zeit von dem Gas abgegebene Wärmemenge $mc(t-t')$ ersetzt, und es mufs demnach $mc(t-t') = MT$ sein, aus welcher Gleichung sich die spezifische Wärme des Gases ergibt. Auf diesem Wege wurden folgende Werte gefunden:

| | | | |
|---|---|---|---|
| Luft | 0,2375 | Wasserstoff | 3,4090 |
| Sauerstoff | 0,2175 | Kohlenoxyd | 0,2425 |
| Stickstoff | 0,2438 | Chlor | 0,1214 |

Multiplizirt man diese Zahlen mit den spezifischen Gewichten (den Gewichten gleicher Volumina) der betreffenden Gase, so erhält man für alle nahezu das gleiche Produkt, d. h. gleiche Raumteile verschiedener Gase erfordern für gleiche Erwärmung gleich grofse Wärmemengen. Da die spezifischen Gewichte der gasförmigen Körper sich verhalten wie die Molekulargewichte (Avogadros Gesetz, 89), so kann man auch sagen, die Molekularwärmen aller (vollkommenen) Gase sind einander gleich.

Bei der beschriebenen Versuchsanordnung setzt sich das erwärmte Gas mit dem äufseren Luftdruck ins Gleichgewicht, indem es sich diesem Drucke entgegen ausdehnt; für die hierbei zu leistende Arbeit wird (ähnlich wie bei der Verdampfung) ein Teil der zugeführten Wärme verbraucht. Um dieselbe Gasmasse in einem starren Gefäfs von unabänderlichem Rauminhalt ebenso stark zu erwärmen, wird weniger Wärme erfordert, weil hier keine Ausdehnung stattfinden kann, und daher auch keine Arbeit zu leisten ist. Man unterscheidet daher bei den Gasen zwei verschiedene spezifische Wärmen, nämlich jene gröfsere spezifische Wärme bei konstantem Druck und diese kleinere spezifische Wärme bei konstantem Volumen. Bei festen und flüssigen Förpern braucht dieser Unterschied nicht gemacht zu werden, weil wegen ihrer geringeren Ausdehnung die zur Überwindung des äufseren Drucks erforderliche Arbeit zu geringfügig ist. Bei Gasen dagegen offenbart sich dieser Wärmeverbrauch z. B. schon dadurch, dafs ein Gas, welches sich unter Überwindung eines Drucks und ohne äufsere Wärmezufuhr (adiabatisch) ausdehnt, sich in beträchtlichem Mafse abkühlt, indem es die zur Arbeit nötige Wärme aus seinem eigenen Wärmevorrat entnimmt. Ist die Luft unter der Glocke der Luftpumpe mit Wasserdampf gesättigt, so entsteht schon beim ersten Kolbenzug infolge der Abkühlung Nebel, und ein gleichzeitig unter der Glocke befindliches Thermometer (z. B. Breguets Metallthermometer, Fig. 103) sinkt. Umgekehrt mufs sich bei Verdichtung eines Gases Wärme entwickeln. Hierauf beruht das sogenannte pneumatische Feuerzeug: wird nämlich ein Kolben rasch in einen Luft enthaltenden Cylinder gestofsen, so erhitzt sich die zusammengeprefste Luft so stark, dafs sich ein unten am Kolben angebrachtes Stückchen Zunder entzündet.

Die beschriebenen Vorgänge adiabatischer Abkühlung oder Erwärmung spielen eine grofse Rolle in der Atmosphäre. Aufsteigende Luftmassen dehnen sich aus, weil mit der Höhe der Druck abnimmt, kühlen sich dadurch ab und verdichten ihren Wasserdampf zu Wolken und Niederschlägen (Wolken des aufsteigenden Luftstromes, Cumuluswolken). Niedersinkende Luftmassen erwärmen sich und vermindern dadurch ihre relative Feuchtigkeit. (Erklärung des Föhns durch Hann und Helmholtz.)

Die direkte Bestimmung der spezifischen Wärme bei konstantem Volumen ist nicht ausführbar, weil das Gewicht eines in einer starren Hülle eingeschlossenen Gases im Verhältnis zu dem Gewicht der Hülle zu klein ist. Man kann aber das Verhältnis der beiden spezifischen Wärmen $c$ und $c'$ finden,

wenn man die kleine Temperaturerhöhung $\vartheta$ ermittelt, welche eine Luftmenge erfährt, wenn man sie rasch um soviel zusammengepreſst, als sie sich bei der Erwärmung um 1° bei konstantem Druck ausgedehnt haben würde. Die im letzten Fall erforderliche Wärmemenge $c$ müſste dann hinreichen, um diese Luftmenge bei unveränderlichem Volumen um $1 + \vartheta$ Grade zu erwärmen, d. h. es muſs, wenn $c'$ die spezifische Wärme bei konstantem Volumen bezeichnet, $c = c'(1 + \vartheta)$ oder $\frac{c}{c'} = 1 + \vartheta$ sein. Nach einer sehr sinnreichen Methode haben zuerst Clement und Desormes (1819) derartige Versuche ausgeführt. Für Luft ergibt sich aus den besten Versuchen das Verhältnis $c/c' = 1{,}41$; für die übrigen Gase hat es nahezu denselben Wert. Hiermit findet man die spezifische Wärme der Luft bei konstantem Volumen:

$$c' = \frac{c}{1{,}41} = \frac{0{,}2375}{1{,}41} = 0{,}1684.$$

125. **Wärmeleitung.** Hält man einen Metalldraht in eine Kerzenflamme, so wird derselbe, indem die Wärme von dem erhitzten Ende den Draht entlang fortwandert, auch am anderen Ende bald so heiſs, daſs man ihn nicht mehr zwischen den Fingern halten kann: ein gleichlanges Holzstäbchen dagegen kann man an seinem Ende anzünden und fast bis zu den Fingern abbrennen lassen, ohne eine Temperaturerhöhung zu fühlen. Ein silberner Schöpflöffel, in die heiſse Suppe gesteckt, wird sehr rasch auch an seinem Griff heiſs, während ein hölzerner Kochlöffel unter denselben Umständen nur langsam und in geringem Grade sich erwärmt. Diese Fortpflanzung der Wärme in den Körpern durch Mitteilung von den wärmeren an die kälteren Stellen nennt man Wärmeleitung. Wie aus den angeführten Beispielen schon hervorgeht, ist das Wärmeleitungsvermögen der verschiedenen Körper sehr verschieden. Unter allen Körpern leiten die Metalle die Wärme am besten; Holz, Asche, Stroh, Seide, Federn, Haare, Wolle etc., überhaupt lockere Stoffe aus dem Tier- und Pflanzenreich, sind die schlechtesten Wärmeleiter; etwas besser leiten Steine, Glas, Porzellan. Das Wärmeleitungsvermögen der verschiedenen Metalle ist übrigens sehr ungleich, wie man durch folgenden Versuch leicht zeigen kann. Eine Kupferstange und eine gleich dicke Eisenstange werden wagrecht, mit ihren Enden sich berührend, aufgestellt und auf ihrer Unterseite in gleichen Abständen von der Berührungsstelle hölzerne Kugeln mittels Wachs angeklebt. Erwärmt man nun die Berührungsstelle so verbreitet sich die Wärme in dem Kupferstab rascher, und es fallen von ihm mehr Kugeln ab als von dem Eisenstab.

Wird ein Metallstab (Fig. 124) an einem Ende erwärmt, der in gleichen Abständen Thermometer trägt, die in Bohrlöcher des Stabes eingesenkt sind, so bemerkt man, daſs nach einiger Zeit jedes Thermometer einen festen Stand erreicht und sonach in der Wärmeverteilung längs des Stabes ein Gleichgewichtszustand eintritt, welcher dadurch bedingt ist, daſs nun jedem Querschnitt des Stabes von der Wärmequelle ebensoviel Wärme zuflieſst, als er nach der anderen Seite hin abgibt. Diese Abgabe erfolgt aber nicht bloſs

infolge des Abfliefsens der Wärme innerhalb des Stabes nach dem kälteren Ende hin, sondern auch dadurch, dafs der Stab durch seine Oberfläche an die kältere Umgebung fortwährend Wärme verliert. Man unterscheidet daher ein inneres und ein äufseres Wärmeleitungsvermögen und versteht unter innerer Leitungsfähigkeit die Wärmemenge, welche durch einen Würfel der Substanz von 1 cm Seite in 1 Sekunde hindurchgeht, wenn zwei gegenüberliegende Flächen einen Temperaturunterschied von 1° C. besitzen und die übrigen Flächen als für Wärme undurchlässig gedacht werden; unter äufserer Leitungsfähigkeit aber versteht man die Wärmemenge, welche ein Körper bei einem Temperaturüberschufs von 1° über die Umgebung an diese durch 1 qcm seiner Oberfläche in 1 Sekunde abgibt. Die Wärmemengen denkt man sich dabei durch die kleinere Wärmeeinheit oder Grammkalorie gemessen, nämlich durch die Wärmemenge, welche erforderlich ist, um 1 g Wasser um 1° zu erwärmen.

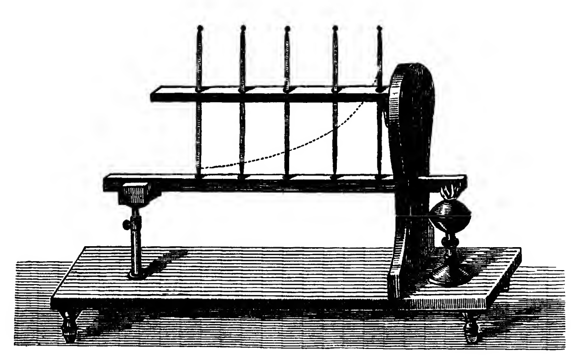


Fig. 124.
Wärmeleitung.

Hat der Metallstab das Wärmegleichgewicht oder den „stationären Zustand“ erreicht, so ergibt sich, dafs die Temperaturüberschüsse der aufeinander folgenden Thermometer das Gesetz befolgen, dafs jeder folgende der nämliche Bruchteil von dem vorhergehenden ist, oder dafs, wenn die Entfernungen von der Wärmequelle in arithmetischer Reihe wachsen, die Temperaturerhöhungen in geometrischer Reihe abnehmen, ein Gesetz, das durch die punktirte krumme Linie, welche die Gipfelpunkte der Quecksilbersäulen (Fig. 124) verbindet, versinnlicht wird (Desprez, 1822).

Der Abfall der Kurve vom wärmeren nach dem kälteren Ende des Stabes veranschaulicht zugleich das an jeder seiner Stellen vorhandene Temperaturgefälle; darunter versteht man für zwei nahe gelegene Punkte das Verhältnis ihres Temperaturunterschiedes zu ihrem Abstand. Die Wärmemenge, welche durch einen beliebigen Querschnitt des Stabes durch innere Leitung in einer Sekunde fliefst, würde man erhalten, wenn man das Produkt aus Querschnitt und

Gefälle noch mit dem inneren Leitungsvermögen der Substanz multipliziert. Diese Wärmemenge muſs aber im stationären Zustande derjenigen gleich sein, welche das ganze jenseits dieses Querschnitts liegende Stabende durch äuſsere Leitung pro Sekunde verliert. Letztere Wärmemenge läſst sich aber aus der Oberfläche dieses Stabstückes und den Angaben der Thermometer berechnen, wenn die äuſsere Leitungsfähigkeit bekannt ist. Das äuſsere Leitungsvermögen aber findet man, wenn man den Wärmeverlust pro Minute beobachtet, den ein Stück derselben Substanz, dessen Gewicht, Oberfläche und spezifische Wärme bestimmt sind, bei bekanntem Temperaturüberschuſs über die Umgebung erleidet. Auf diese Weise kann man die beiden Wärmeleitungsfähigkeiten den obigen Definitionen gemäſs in absolutem Maſse ermitteln.

Die verhältnismäſsige (innere) Leitungsfähigkeit verschiedener Körper kann man finden durch Beobachtungen an Stäben von gleicher Gestalt, deren äuſsere Wärmeleitungsfähigkeit durch Überziehen mit Firnis oder durch Versilberung für alle möglichst gleich gemacht wurde. Unter diesen Umständen verhalten sich die inneren Leitungsfähigkeiten wie die Quadrate der Entfernungen von der Wärmequelle, in welchen nach Eintritt des stationären Zustandes gleiche Temperaturüberschüsse stattfinden. Wiedemann und Franz (1853) bestimmten die Temperaturen mit Hilfe eines thermoelektrischen Elements (s. u.) und erhielten Werte für die relativen (inneren) Leitungsfähigkeiten der Metalle, aus denen sich eine eigentümliche Beziehung zur elektrischen Leitungsfähigkeit derselben Metalle ergab (vgl. 223).

Neuere Messungen haben für die absoluten Leitungsfähigkeiten folgende Werte ergeben:

| | | | |
|---|---|---|---|
| Silber | 1,00 | Zinn | 0,15 |
| Kupfer | 0,93 | Eisen | 0,15 |
| Gold | 0,70 | Blei | 0,08 |
| Zink | 0,26 | Neusilber | 0,08 |
| Platin | 0,17 | Wismut | 0,02 |

Hiernach gehen z. B. durch einen Kupferwürfel von 1 cm Seite, bei einem Temperaturunterschied zweier gegenüberliegenden Flächen von 1° C. in der Sekunde 0,93 Grammkalorien, in der Minute 56 Grammkalorien hindurch.

Im täglichen Leben machen wir von der guten oder schlechten Wärmeleitungsfähigkeit der verschiedenen Körper vielfache Anwendungen. Um uns die Finger nicht zu verbrennen, versehen wir Theekannen, Ofenthüren und Schürhaken mit hölzernen Griffen. Bäume und Sträucher umwickelt man im Winter mit Stroh, um sie vor dem Erfrieren zu schützen. Unsere Kleider, welche aus schlechten Wärmeleitern verfertigt sind, „geben“ zwar nicht warm, aber sie „halten“ uns warm, indem sie die rasche Abgabe der Körperwärme an die kalte Umgebung verhindern. Andererseits verhindert man durch Stroh und andere schlechte Wärmeleiter das Eindringen der äuſseren

Wärme in die Eiskeller, und verpackt Eis, welches verschickt werden soll, in Sägespäne. Die feuersicheren Geldschränke enthalten zwischen ihren Doppelwänden Asche, welche den Zutritt der Hitze verzögert. In einem kalten Zimmer fühlt sich die metallene Thürklinke kälter an als der Tischteppich, obgleich beide die nämliche Temperatur haben, weil das Metall die Wärme unserer Hand rascher fortleitet und daher der Hand mehr Wärme entzieht als das schlecht leitende Gewebe; in einem Raum, der auf eine höhere als unsere Körpertemperatur erwärmt wäre, würde sich umgekehrt das Metall heifser anfühlen als der Teppich, weil jenes der Hand mehr Wärme zuführt als dieser. Umgibt man einen Cylinder, der zur Hälfte aus Kupfer, zur Hälfte aus Holz besteht, mit einer dicht anschliefsenden Papierhülse und hält ihn über eine Flamme, so verkohlt das Papier, soweit es die hölzerne Hälfte bedeckt; über der Kupferhälfte aber bleibt es unversehrt, weil das Metall, indem es die zugeführte Wärme rasch fortleitet, das Papier nicht bis zur Verbrennungstemperatur kommen läfst. In ähnlicher Weise erklärt sich auch das merkwürdige Verhalten von Drahtnetzen gegenüber Flammen. Hält man ein feines Drahtgewebe in eine Gasflamme, so erscheint dieselbe wie abgeschnitten; die metallenen Fäden leiten nämlich die Wärme so rasch ab, dafs die Flammengase unter ihre Entzündungstemperatur abgekühlt werden. Läfst man das Gas, ohne es anzuzünden, aus dem Brenner strömen und hält das Drahtnetz in den Gasstrom, so kann man letzteren oberhalb des Netzes anzünden, ohne dafs sich die Entzündung unter das Netz fortpflanzt. Auf diesem Verhalten beruht Davys Sicherheitslampe. Die Flamme einer Öllampe ist von einem cylindrischen, oben geschlossenen Drahtnetz umgeben; betritt der Bergmann mit einer solchen Lampe einen Stollen, in welchem sich Kohlenwasserstoffgas der Luft beigemischt und sogenannte „schlagende Wetter“ gebildet hat, nämlich ein Gasgemisch, welches an offener Flamme sich entzünden und explodiren würde, so dringt das brennbare Gas zwar durch die Maschen des Netzes zur Flamme und verbrennt unter schwachen Explosionen im Innern des Drahtcylinders, die Entzündung vermag sich aber nicht nach aufsen fortzupflanzen.

Die Flüssigkeiten sind schlechte Wärmeleiter; in ihnen verbreitet sich die Wärme vorzugsweise durch Strömungen (Konvektion), welche dadurch entstehen, dafs beim Erwärmen von unten die durch Ausdehnung spezifisch leichter gewordenen Flüssigkeitsteile nach oben steigen und durch die herabsinkenden kälteren Teile ersetzt werden; durch diesen Kreislauf, auf welchen sich die Wasserheizung gründet, wird die Erwärmung einer Flüssigkeit ungemein befördert. Erwärmt man dagegen von oben, so verbreitet sich die Wärme vermöge der schlechten Leitungsfähigkeit nur sehr langsam nach unten. In einem schräg gehaltenen Probirröhrchen kann man das Wasser oben zum Kochen bringen, während ein Stückchen Eis, welches am Boden des Gläschens durch einen schweren Körper festgehalten wird,

nicht merklich schmilzt. Die absolute Leitungsfähigkeit des Wassers beträgt nur 0,0012.

Die Gase leiten die Wärme ebenfalls sehr schlecht; ruhende Luftschichten, wie z. B. die zwischen Doppelfenstern eingeschlossene Luftschicht, sind daher sehr geeignet, die Fortleitung der Wärme zu verhindern. Die oben als schlecht leitend bezeichneten tierischen und pflanzlichen Stoffe (Stroh, Wolle etc.) verdanken ihre „warm haltende“ Eigenschaft vorzugsweise der in ihren Zwischenräumen festgehaltenen schlecht leitenden Luft Die Wärmeleitungsfähigkeit der Gase ist übrigens ungleich; Wasserstoffgas leitet die Wärme viel besser als alle übrigen Gase. Das absolute Leitungsvermögen der Luft ist 0,000056, dasjenige des Wasserstoffs etwa siebenmal so grofs (Stefan, 1872).

126. **Wärmestrahlung.** Wendet man das Gesicht einem geheizten Ofen zu, so empfindet man Hitze; dieses erhöhte Wärmegefühl verschwindet sofort, wenn ein Ofenschirm vor den Ofen gestellt wird; es kann demnach nicht von der erwärmten Luft des Zimmers, welche mit unserer Haut nach wie vor in Berührung ist, hervorgerufen sein, sondern mufs eine von dem Ofen ausgehende Wirkung sein, welche durch ein zwischen unser Gesicht und den Ofen gebrachtes Hindernis aufgehalten wird, und welche wir dadurch bezeichnen, das wir sagen: „der Ofen strahlt Wärme aus.“ Diese Wärmestrahlen pflanzen sich in gerader Linie durch die Luft fort, ohne dieselbe unmittelbar zu erwärmen, und wirken erst dann erwärmend, wenn sie auf einen Körper treffen, der sie nicht oder nur teilweise durchläfst, sondern sie in sich aufnimmt, verschluckt oder absorbirt; man sieht z. B. die Eisblumen an den Fensterscheiben unter der Einwirkung der vom Ofen ausgehenden Wärmestrahlen bereits schmelzen, wenn auch die Temperatur der Zimmerluft noch unter dem Gefrierpunkt ist. Diese unsichtbaren Strahlen, welche von jedem warmen oder heifsen Körper ausgehen, werden von Spiegeln zurückgeworfen, von Prismen und Linsen gebrochen, an rauhen Flächen zerstreut und absorbirt nach denselben Gesetzen wie die Lichtstrahlen. Zudem sind die Lichtstrahlen zugleich auch Wärmestrahlen, denn sie wirken erwärmend auf einen Körper, der sie absorbirt. Wir werden daher die Erscheinungen der strahlenden Wärme erst später im Zusammenhange mit den Lichterscheinungen betrachten, und beschränken uns hier auf die Erwähnung einiger alltäglicher Erfahrungen.

Ein bestrahlter Körper wird sich um so höher erwärmen, je vollständiger er die auf ihn fallenden Strahlen verschluckt, oder je weniger er davon durch diffuse Zurückwerfung wieder zurückgibt; d u n k l e Körper erwärmen sich daher bei gleicher Bestrahlung höher als h e l l e. Aus diesem Grunde bedienen wir uns im Winter dunkler, im Sommer heller Kleidung. Dunkel gefärbte Ackererde wird unter dem Einflufs der Sonnenstrahlen stärker erwärmt als weifslicher Kalkboden. Der Kienrufs, welcher alle Strahlenarten fast vollkommen

absorbirt und eben darum schwarz aussieht, wird durch Bestrahlung stärker erwärmt als irgend ein anderer Körper. Streut man Rufs auf den Schnee, so wird man bemerken, dafs der Schnee unter dem Rufs rascher schmilzt als der benachbarte, und dafs, der Rufsspur folgend, eine tiefe Rinne im Schnee sich bildet. Diejenigen Körper, welche die Wärmestrahlen am besten einsaugen, strahlen umgekehrt ihre Wärme auch am leichtesten wieder aus: das Ausstrahlungsvermögen wächst in demselben Verhältnis wie das Absorptionsvermögen. Heifses Wasser erkaltet in einem rufsigen Topf rascher als in einem blanken. Ein Thermometer mit berufster Kugel steigt im Sonnenschein viel rascher und höher als ein ganz gleiches Thermometer mit blanker Kugel, kühlt sich aber auch im Schatten viel rascher ab. Verschiedene Thermometer zeigen an der Sonne verschiedene Temperaturen je nach ihrem Absorptionsvermögen; die Angaben eines von der Sonne beschienenen Thermometers sind daher für die Beurteilung der Lufttemperatur ganz wertlos.

Es versteht sich von selbst, dafs nur Strahlen, welche in einen Körper eindringen, von ihm absorbirt werden und ihn erwärmen können. Ein glatt polirter Körper, der schon an seiner Oberfläche einen Teil der Strahlen zurückwirft, erwärmt sich bei gleicher Bestrahlung weniger, als wenn man ihm eine rauhe Oberfläche gibt. Andererseits strahlt ein warmer Körper seine Wärme reichlicher aus, wenn seine Oberfläche matt, als wenn sie polirt ist. In einer blank geputzten metallenen Kaffeekanne hält sich daher das Getränk längere Zeit heifs, als wenn die Oberfläche der Kanne unrein ist. Also auch in dieser Hinsicht erweisen sich die besten Einsauger zugleich als die besten Ausstrahler.

Auf dem gleichen Prinzip beruhen die „Dewarschen Flaschen“, deren man sich bedient, um flüssige Luft oder andere auf sehr tiefer Temperatur befindliche Stoffe unter möglichstem Schutz vor starker Wärmezufuhr und entsprechend schnellem Verdampfen aufzubewahren. Das sind doppelwandige Glasflaschen. Der Zwischenraum zwischen den beiden Wänden ist leergepumpt, um Wärmezufuhr durch die Leitung des Gases u verhindern, und enthält einige Tropfen Quecksilber. Sobald die Flasche mit der flüssigen Luft gefüllt wird, schlägt sich der Quecksilberdampf auf der inneren Wand als glänzender Spiegel nieder, der die Strahlung der wärmeren Umgebung in beträchtlichem Mafse reflektirt. In derartigen Flaschen verdampft flüssige Luft nur sehr langsam und läfst sich stundenlang in ihnen aufbewahren.

Dafs das Ausstrahlungsvermögen eines Körpers seinem Absorptionsvermögen gleich sei, folgt übrigens schon aus dem sogenannten Prinzip des beweglichen Gleichgewichts der Wärme (Prevost, 1809). Jeder Körper sendet Wärmestrahlen aus und empfängt solche von den umgebenden Körpern. Hat er mit diesen gleiche Temperatur erreicht, so ändert sich erfahrungsgemäfs sein Erwärmungsgrad nicht mehr, obgleich die gegenseitige Zustrahlung fortdauert. Dies ist aber nur dann möglich, wenn er in gleicher Zeit ebensoviel Wärme aufnimmt als er ausstrahlt.

127. **Mechanische Wärmetheorie.** Erster Hauptsatz. Zur

Erklärung der Wärmeerscheinungen nahm man früher einen eigentümlichen unwägbaren Wärmestoff an, welcher, indem er in die Körper in gröfserer oder geringerer Menge eindringe, ihre verschiedenen Erwärmungsgrade, ihre Ausdehnung, das Schmelzen und Verdampfen etc. hervorbringen sollte. Diese „Wärmestofftheorie" vermochte jedoch weder von den Erscheinungen der Wärmestrahlung noch von der Thatsache, dafs durch Reibung oder überhaupt durch mechanische Arbeit Wärme erzeugt werden kann, befriedigende Rechenschaft zu geben. Die gegenwärtig allgemein anerkannte mechanische Wärmetheorie (Thermodynamik) dagegen nimmt an, dafs Wärme eine Form der Energie sei, dafs sie aus anderen Energieformen entstehen und sich in andere umsetzen kann, und um sich davon eine anschauliche Vorstellung zu bilden, hat man die weitere Hypothese hinzugenommen, dafs Wärme geradezu Bewegungsenergie selbst sei, nämlich Bewegungsenergie der kleinsten Körperteilchen (Moleküle), deren Bewegungen zwar wegen der Kleinheit dieser Teilchen unserem Auge nicht sichtbar sind, auf unseren Gefühlssinn aber denjenigen Eindruck hervorbringen, welchen wir „Wärme" nennen. Um zu erläutern, wie sich die Erzeugung von Wärme durch mechanische Arbeit nach dieser Vorstellung erklärt, betrachten wir einen Schmied, der ein Stück Eisen hämmert. Indem er den Hammer emporhebt, leistet er Arbeit, vermöge welcher der Hammer beim Herabfallen die Wucht erlangt, die ihn zur Bearbeitung des Eisens befähigt. Der niederfallende Hammer kommt nun, nachdem er das auf dem Ambofs liegende Eisen berührt hat, zur Ruhe, seine fortschreitende Bewegung wird plötzlich gehemmt; die Wucht aber, die ihm innewohnte, ist keineswegs spurlos verschwunden, sondern sie ist in die getroffenen Körper übergegangen, indem sie in denselben schwingende Bewegungen wachrief, in welchen sich die anscheinend verschwundene Wucht des Hammers ungeschmälert wiederfindet. Der Ambofs gerät in heftige Erzitterungen, ähnlich denjenigen einer angeschlagenen Glocke, und sendet lauten Klang zu unserem Ohr. Im gehämmerten Eisen aber werden Schwingungen seiner Moleküle erregt, die wir als Wärme empfinden; das Eisen erwärmt sich und kann durch fortgesetztes Hämmern sogar zum Glühen gebracht werden. Die Arbeit, welche der Schmied bei jedem Hammerschlag leistet, ist um so gröfser, je schwerer sein Hammer ist, und je höher er ihn hebt. Wiegt der Hammer 1 kg, und wird er 1 m hoch gehoben, so beträgt die hierzu erforderliche Arbeitsgröfse ein Meterkilogramm; durch dieselbe Gröfse wird die Wucht (Bewegungsenergie) gemessen, mit welcher der Hammer auf den Ambofs trifft. Dieser Wucht entspricht nun genau die Menge Wärme, welche beim Hämmern des Eisens (in diesem selbst, im Hammer, Ambofs und in der Luft durch Fortpflanzung des Schalles) entwickelt wird.

Durch die Reibung, indem sie Bewegung hemmt, entsteht bekanntlich ebenfalls Wärme. Ein Metallknopf, an Holz oder Leder gerieben, wird heifs. Die Wilden machen Feuer, indem sie zwei

Holzstücke aneinander reiben, und wir selbst, indem wir den Phosphor der Zündhölzchen durch Reibung auf seine Verbrennungstemperatur erhitzen. Wird ein Eisenbahnzug durch Bremsen zum Stehen gebracht, so erwärmen sich Räder und Bremsen.

Eine Untersuchung der zahlenmäfsigen Beziehung, die bei der Erzeugung von Wärme durch Reibung zwischen der aufgewandten Arbeit und der erzeugten Wärme besteht, ist zuerst von Joule (1850) mittels des in Fig. 124 abgebildeten Apparates ausgeführt worden. An der Spindel *S* sitzt ein messingnes Schaufelrad, das aus acht, in der angedeuteten Weise ausgeschnittenen Flügeln besteht. Dieser Apparat dreht sich in einem kupfernen Kessel *G* mit vier vertikalen feststehenden Zwischenwänden, durch deren passend geformte Ausschnitte die Schaufeln des Rades bei der Drehung hindurchtreten. Der Kessel ist mit Wasser gefüllt, das durch die beschriebene Vorrichtung bei der Drehung der Spindel sehr kräftig durcheinander

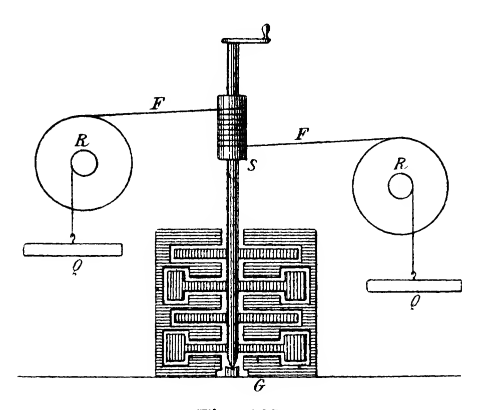



Fig. 125.
Joule's Apparat zur Bestimmung des mechanichen Wärmeäquivalents.

gerührt und dadurch erwärmt wird. Aus der gemessenen Temperaturerhöhung nach einer bestimmten Anzahl von Umdrehungen und aus der Wärmekapazität des Apparates läfst sich die erzeugte Wärme berechnen. Die Arbeit andererseits, die aufgewandt werden mufste, um jene Anzahl von Umdrehungen auszuführen, wurde dadurch gemessen, dafs die Drehungen der Spindel unmittelbar durch die heruntersinkenden Gewichte *Q* mit Hilfe der Räder *R* und der Fäden *F* bewirkt wurden. Der Betrag der Gewichte in Kilogrammen multiplizirt mit der Fallhöhe in Metern, die sie während jener Umdrehungen zurückgelegt haben, gibt die Arbeit in Meterkilogrammen (17). Solche Versuche, die Joule ausführte mit Wasser, mit Quecksilber und mit Reibung von Gufseisen auf Gufseisen, ergaben, dafs in allen Fällen, um eine Wärmemenge von 1000 Grammkalorien oder eine Kilogrammkalorie zu erzeugen, eine Arbeitsleistung von 424 Meterkilogrammen erforderlich war. Diese Zahl von 424 Meterkilogrammen

nennt man das mechanische Äquivalent der Wärme; sie drückt eine unabänderliche Gröfsenbeziehung zwischen Wärme und Arbeit aus, die ganz unabhängig davon ist, durch welche mechanische Prozesse, Reibung, Stofs oder drgl. die Wärme erzeugt wird. Sie gilt aber ebenso für die umgekehrte Umsetzung, für die Erzeugung von Arbeit durch Wärme. Dafs eine solche möglich ist, zeigt uns ja jede Dampfmaschine; die Energie der Bewegung, mit welcher ein Bahnzug dahinrollt, entsteht offenbar aus der Wärme des Feuers, welches unter dem Dampfkessel der Lokomotive unterhalten wird, und zwar verschwindet, wie Hirn durch Versuche an Dampfmaschinen nachgewiesen hat, für je 424 Meterkilogramm Arbeit, welche die Maschine durch Fortbewegung des Bahnzuges leistet, eine Wärmeeinheit, indem sie sich aus der Form unsichtbarer molekularer Bewegung in die Wucht sichtbar bewegter Massen umwandelt. Man bezeichnet den von Robert Mayer 1842 zuerst erkannten Satz von der Äquivalenz von Wärme und Arbeit als ersten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie.

128. **Aggregatzustände.** Die Einsicht, dafs die Wärme nicht etwa ein Stoff, sondern Arbeit oder Bewegungsenergie ist, in Verbindung mit der Annahme, dafs die Körper aus individuellen kleinsten Teilchen (Molekülen) zusammengesetzt seien, gibt nun von den Wärmeerscheinungen, welche wir bisher als Erfahrungsthatsachen kennen gelernt, eine zwar hypothetische, aber einheitliche und übersichtliche Erklärung.

Ein fester Körper ist anzusehen als eine Anhäufung (ein „Aggregat“) von Molekülen, welche, ohne sich unmittelbar zu berühren, durch die zwischen ihnen thätigen Molekularkräfte zu einem Ganzen zusammengehalten werden. Jedem Molekül ist durch das Zusammenwirken der von seinen Nachbarmolekülen ausgeübten Kräfte eine bestimmte Gleichgewichtslage angewiesen, aus welcher es nur durch die Einwirkung äufserer Kräfte entfernt und in eine neue Gleichgewichtslage übergeführt werden kann; hören diese äufseren Kräfte auf zu wirken, so wird es durch die Molekularkräfte wieder in die frühere Gleichgewichtslage zurückgetrieben; hieraus erklärt sich die den festen Körpern eigene Elasticität. Die Moleküle befinden sich aber in ihrer jeweiligen Gleichgewichtslage nicht in Ruhe, sondern sie vollführen sehr rasche Schwingungen um dieselbe; die Wucht, mit welcher die schwingenden Moleküle gegen den berührenden Finger anprallen, empfinden wir als Wärme. Der Erwärmungsgrad oder die Temperatur eines Körpers ist demnach proportional der Wucht der Bewegung seiner Moleküle. Einen festen Körper erwärmen heifst daher nichts anderes als die Moleküle in lebhaftere Schwingungen versetzen oder ihre Schwingungsweite vergröfsern; indem sich aber jetzt die schwingenden Moleküle weiter als zuvor von ihren Gleichgewichtslagen entfernen, beanspruchen sie einen gröfseren Spielraum für ihre Bewegungen und drängen sich gegenseitig auseinander in neue weiter voneinander entfernte Gleichgewichtslagen.

Der Rauminhalt des Körpers wird daher beim Erwärmen vergröſsert, der Körper dehnt sich aus. Dem Auseinanderweichen der Moleküle widersetzen sich aber die Molekularkräfte; zur Überwindung ihres Widerstandes wird eine gewisse Menge der zugeführten Wärme oder Arbeit verbraucht, indem sie innere Arbeit leistet. Besteht auch noch ein äuſseres, der Ausdehnung widerstrebendes Hindernis, wie z. B. der Druck eines den Körper umgebenden Gases, so muſs auch dieses überwunden werden; der hierzu nötige Aufwand von Energie (Wärme oder Arbeit) leistet demnach äuſsere Arbeit. Wird der Körper wieder auf seinen anfänglichen Zustand zurückgebracht, so gibt er die gesamte ihm zugeführte Wärmemenge wieder heraus, auch diejenige, welche zu innerer und äuſserer Arbeit verbraucht und dabei als Wärme verschwunden war.

Durch fortgesetzte Erwärmung eines festen Körpers wird der Zusammenhang seiner Moleküle immer mehr gelockert. Bei einer bestimmten Temperatur tritt dann eine Aufhebung des bisherigen festen Zusammenhanges ein. Die Moleküle kehren nicht mehr in ihre Gleichgewichtslagen zurück, sondern werden von anderen Molekülen in andere Lagen hinübergezogen. Sie nehmen daher eine fortschreitende Bewegung an, indem sie nebeneinander fortgleiten und sich verschieben, ohne sich jedoch, da ein geringer Grad von gegenseitiger Anziehung noch vorhanden ist, völlig voneinander zu trennen: der Körper geht in den flüssigen Zustand über, er schmilzt. Ist der Schmelzpunkt erreicht, so wird die noch weiter zugeführte Wärme nicht mehr zu höherer Erwärmung, sondern zu innerer Arbeit verwendet, indem sie die Kräfte zu überwinden hat, welche die Moleküle in ihrem bisherigen Gleichgewichtszustand zurückhielten. Diese zu innerer Arbeit verbrauchte und daher verschwundene Arbeit ist die Schmelzwärme. Diese ganze innere Arbeit muſs, wenn der geschmolzene Körper erstarrt, wieder in der Form von Wärme zum Vorschein kommen, oder, wie man sich im Sinne der Wärmestofftheorie ausdrückte, die beim Schmelzen gebundene Wärme wird beim Erstarren wieder frei.

An der freien Oberfläche der Flüssigkeit werden diejenigen Moleküle, welche die Grenze des Wirkungskreises ihrer Nachbarmoleküle überschreiten, von diesen nicht mehr zurückgezogen, sondern sie fliegen mit der Geschwindigkeit, welche sie im Augenblick des Überschreitens besaſsen, in den über der Flüssigkeit befindlichen Raum geradlinig hinaus. Diese frei dahinschieſsenden, von den Fesseln der Kohäsion befreiten Moleküle befinden sich nun im gas- oder luftförmigen Zustand, sie bilden den aus der Flüssigkeit sich entwickelnden Dampf. Dieses Verdampfen, nämlich das Loslösen und Fortfliegen einzelner Moleküle von der Oberfläche der Flüssigkeit, findet bei jeder Temperatur statt, jedoch selbstverständlich um so reichlicher, je höher die Temperatur der Flüssigkeit, d. h. je lebhafter die Bewegung ihrer Moleküle ist. Der Druck des Dampfes wird durch die Stöſse der dahinfliegenden Moleküle gegen die Gefäſs-

wände hervorgebracht, wo sie ähnlich wie elastische Bälle zurückgeworfen werden. Die gegen die Flüssigkeitsoberfläche zurückkehrenden Moleküle werden daselbst entweder reflektirt oder zurückbehalten und der Flüssigkeit wieder einverleibt, je nachdem die Bewegungsenergie an der getroffenen Stelle gröſser oder kleiner ist. Im begrenzten Raume wird daher die Anzahl der Dampfmoleküle so lange zunehmen, bis in gleicher Zeit ebensoviele Moleküle die Oberfläche der Flüssigkeit verlassen als dahin zurückkehren; dann ist der stationäre Sättigungszustand oder das Maximum der Spannkraft erreicht. Eine in dem Raume etwa vorhandene andere Gasart kann diesen Vorgang offenbar nicht hindern (Daltonsches Gesetz).

Da bei der Verdampfung stets diejenigen Moleküle davonfliegen, welche zufällig die gröſste Geschwindigkeit besitzen, so muſs die durchschnittliche Bewegungsenergie der zurückbleibenden geringer werden, d. h. die verdampfende Flüssigkeit kühlt sich ab (Verdunstungskälte), wenn der Energieverlust nicht durch Wärmezufuhr von auſsen gedeckt wird. Im Innern der Flüssigkeit kann erst dann Dampf entstehen, wenn die Bewegung der Moleküle so lebhaft geworden ist, daſs ihr Bestreben, fortzufliegen, den Druck der Flüssigkeit und den auf ihr lastenden Luftdruck zu überwinden vermag. Ist die hierzu erforderliche Temperatur, der Siedepunkt, erreicht, so verwandelt sich die Flüssigkeit rasch und stürmisch in Dampf, sie siedet, indem alle zugeführte Wärme zu innerer Arbeit, nämlich zum Zerreiſsen der letzten Bande der Kohäsion, als Verdampfungswärme verbraucht oder, wie man früher sagte, „gebunden“ wird. Daſs der Siedepunkt einer Flüssigkeit um so tiefer liegt, einem je geringeren Druck sie ausgesetzt ist, ergibt sich hieraus von selbst.

129. **Kinetische Theorie der Gase.** Wir sind hiermit zu derjenigen Vorstellung über die molekulare Beschaffenheit der luftförmigen Körper gelangt, welche man die mechanische oder kinetische Theorie der Gase (Daniel Bernoulli, 1738, Krönig, 1856, Clausius, 1857) nennt. Nach dieser Anschauung sind die Moleküle eines Gases in rascher, geradlinig fortschreitender Bewegung begriffen, sie fliegen nach den verschiedensten Richtungen durch den Raum und durchlaufen, indem sie unzähligemal aneinander und an entgegenstehenden Hindernissen wie elastische Bälle zurückprallen, einen vielfach verschlungenen, zickzackförmigen Weg. Alle bekannten Eigenschaften der Gase lassen sich aus dieser über die Bewegung ihrer Moleküle gemachten Annahme erklären. Der Druck, welchen ein in rings geschlossenem Gefäſs enthaltenes Gas auf dessen Wände ausübt, wird hervorgebracht durch die unaufhörlichen Stöſse der anprallenden Gasmoleküle: eben weil diese Stöſse in kurzer Zeit nach allen Richtungen erfolgen, muſs aus ihrer vereinten Wirkung ein zur Wand senkrechter Druck hervorgehen, dessen Gröſse der Wucht der stoſsenden Moleküle proportional ist und demnach in demselben Verhältnis wie diese Wucht, d. h. proportional der Temperaturzunahme, wächst (Gay-Lussacs Gesetz). Preſst man, ohne die Temperatur zu ändern,

die abgesperrte Gasmenge auf die Hälfte, ein Drittel etc. ihres anfänglichen Raumes zusammen, so werden in derselben Zeit auf die gleiche Fläche der Wand zwei-, dreimal etc. soviele Moleküle stofsen mit der nämlichen Wucht wie zuvor, der Druck wird also der doppelte, dreifache etc. des anfänglichen geworden sein. Wir kommen so zu dem Mariotteschen Gesetz: der Druck eines Gases steht im umgekehrten Verhältnis seines Rauminhalts.

Betrachten wir jetzt gleiche Raumteile verschiedener Gase bei gleicher Temperatur und gleichem Druck. Dafs ihre Temperaturen gleich sind, heifst nichts anderes, als dafs ihren Molekülen die nämliche Wucht innewohnt, oder dafs jedes Molekül des einen Gases mit derselben Heftigkeit gegen die Gefäfswand prallt wie jedes Molekül des anderen. Soll dabei der Druck der Gase der nämliche sein, so müssen bei jedem Gas während der Zeiteinheit gleich viele Moleküle gegen die Flächeneinheit stofsen; wir sind hiermit zu dem Avogadroschen Gesetz gelangt, dafs bei gleichem Druck und gleicher Temperatur in gleichen Raumteilen verschiedener Gase immer die gleiche Anzahl von Molekülen enthalten ist. Die Molekulargewichte gasförmiger Körper verhalten sich demnach wie die Gewichte gleicher Raumteile oder, was dasselbe heifst, wie ihre spezifischen Gewichte. Bei der genaueren Durchführung dieser Vorstellung hat man zu berücksichtigen, dafs die Moleküle eines Gases bei einer bestimmten Temperatur nicht sämtlich eine und dieselbe Geschwindigkeit haben werden; es werden alle möglichen Geschwindigkeiten vorkommen; aber die Summe aller dieser lebendigen Kräfte, oder die durchschnittliche Wucht dieser Molekularbewegung wird für jede Temperatur einen bestimmten Wert haben.

Wo sich den Gasmolekülen die Wand des umschliefsenden Gefäfses entgegenstellt, üben sie vermöge der Wucht, mit welcher sie gegen dieselbe prallen, einen Druck auf sie aus; wo sie eine Öffnung finden, fahren sie durch dieselbe hinaus. Die Geschwindigkeit des Ausströmens oder der Effusion durch eine enge Öffnung ist daher nichts anderes als die Geschwindigkeit der dahinschiefsenden Moleküle. Die Wucht der molekularen Bewegung, welche den Druck des Gases auf die Gefäfswand bedingt, ist aber proportional dem Produkt der Masse des Moleküls oder des Molekulargewichts mit dem Quadrate seiner Geschwindigkeit. Üben daher zwei Gase gleichen Druck aus, so müssen die Produkte aus ihren Molekulargewichten oder, was nach dem Avogadroschen Gesetz dasselbe ist, aus ihren spezifischen Gewichten mit den Quadraten ihrer Geschwindigkeiten einander gleich sein. Wenn daher verschiedene Gase unter gleichem Druck ausströmen, so verhalten sich die Quadrate ihrer Ausströmungsgeschwindigkeiten umgekehrt wie ihre spezifischen Gewichte (vgl. 92).

Erwärmen wir ein Gas, ohne ihm eine Raumänderung zu gestatten, d. h. während es in einem Gefäfs von unveränderlichem Inhalt eingeschlossen bleibt, so hat die zugeführte Wärme weder äufsere noch innere Arbeit zu vollbringen, weil ja weder die Überwindung

eines äuſseren Drucks noch diejenige widerstrebender Molekularkräfte stattfindet. In diesem Fall wird also alle zugeführte Wärme einzig und allein zur Erwärmung, d. h. zur Vermehrung der molekularen Wucht, verwendet. Wird aber dem zu erwärmenden Gas gestattet, sich auszudehnen und sich dadurch stets mit dem äuſseren unverändert bleibenden Druck ins Gleichgewicht zu setzen, so wird ebensowenig wie im vorigen Fall innere Arbeit zu leisten sein; dagegen muſs ein Teil der zugeführten Wärme zu äuſserer Arbeit, nämlich zur Überwindung des äuſseren Drucks, verbraucht werden. Die zur Erwärmung eines Kilogramm Gas unter diesen Umständen verbrauchte Wärmemenge oder die spezifische Wärme bei unverändertem (konstantem) Druck muſs demnach gröſser sein als diejenige bei unverändertem Rauminhalt, weil in ihr doch ein zu äuſserer Arbeit verbrauchter Wärmeanteil enthalten ist, der dem Unterschied der beiden spezifischen Wärmen gleichkommt. Da man nun die Arbeit kennt, welche das sich ausdehnende Gas bei der Erwärmung um $1^0$ C. vollbringt, so kann man die von einer Wärmeeinheit geleistete Arbeit oder das mechanische Äquivalent der Wärme leicht berechnen. Auf diese Weise hat Robert Mayer, der Begründer der mechanischen Wärmetheorie, das Wärmeäquivalent zuerst bestimmt. Preſst man das durch Wärme ausgedehnte Gas wieder auf den ursprünglichen Raum zusammen, so wird die für die Ausdehnung verbrauchte und in Arbeit verwandelte Wärmemenge in Form von fühlbarer Wärme wieder frei.

R. Mayers Rechnung war die folgende. Ein Kilogramm Luft von $0^0$ und 760 mm Druck nimmt einen Raum von 0,773 Kubikmeter ein; in einem Cylinder von 1 Quadratmeter Querschnitt, welcher durch einen beweglichen Kolben verschlossen ist, dehnt sich diese Luftmenge bei $1^0$ Erwärmung um $^1/_{273}$ ihres Volumens aus, und schiebt den Kolben, auf welchem pro Quadratcentimeter der äuſsere Luftdruck von 1,033 kg, also im ganzen ein Druck von 10330 kg, lastet, um 0,773/273 m zurück. Zu der hierbei geleisteten Arbeit von 10330.0,773/273 Meterkilogramm wurde eine Wärmemenge verbraucht, welche dem Unterschied der beiden spezifischen Wärmen (S. 201) gleich ist, also 0,069 Wärmeeinheiten. Die Arbeit einer Wärmeeinheit beträgt also (10330.0,773):(273.0,069) = 424 Meterkilogramm.

Um verschiedene Gase um gleich viel, z. B. um $1^0$ C., zu erwärmen, muſs man die Bewegungsenergie ihrer Moleküle um gleich viel vergröſsern, d. h. die Moleküle aller Gase bedürfen zur gleichen Temperaturerhöhung gleicher Wärmemengen, oder ihre Molekularwärmen (die zur Erwärmung der Molekulargewichte erforderlichen Wärmemengen) sind gleich. Da nach dem Avogadroschen Gesetz alle Gase in gleichen Raumteilen gleich viele Moleküle enthalten und demnach die Molekulargewichte in demselben Verhältnis stehen wie die Gewichte gleicher Raumteile (oder wie die spezifischen Gewichte), so kann man auch sagen, daſs gleiche Raumteile verschiedener

Gase zur gleichen Temperaturerhöhung gleiche Wärmemengen nötig haben. Die spezifischen Wärmen der Gase, d. h. die zur Erwärmung von je 1 kg um 1° C. erforderlichen Wärmemengen stehen demnach im umgekehrten Verhältnis ihrer Molekulargewichte oder ihrer spezifischen Gewichte. Dieses Gesetz wurde unter der Voraussetzung abgeleitet, dafs von der zugeführten Wärme keine innere Arbeit zu leisten ist, und würde daher nur für vollkommene oder ideale Gase streng richtig sein. Sehr nahe trifft es zu für Luft, Sauerstoff, Stickstoff, Wasserstoff, Kohlenoxyd und Stickstoffoxyd (vgl. 124).

130. **Zweiter Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie.** Wärme kann nur dann in mechanische Arbeit (z. B. mittels der Dampfmaschine) verwandelt werden, wenn ein Wärmeübergang aus einem Körper von höherer Temperatur (dem Dampf) auf einen solchen von niedrigerer Temperatur (dem Kühlwasser) stattfindet. Sadi Carnot (1824) verglich deshalb die mechanische Leistung der Wärme mit derjenigen des Wassers, welches ebenfalls nur Arbeit leistet, wenn es von einem höheren zu einem tieferen Niveau herabsinkt, nahm aber an, dafs die Wärme ebenso wie das Wasser unvermindert zu dem tieferen Niveau herabgelange. Clausius (1850) dagegen zeigte, dafs gemäfs dem Satz von der Äquivalenz von Wärme und Arbeit ein Teil der Wärme, indem er eine ihm äquivalente Arbeitsmenge erzeugt, als Wärme verschwindet, während der andere Teil der zugeführten Wärme als solche in den kälteren Körper übergeht, und stellte als zweiten Hauptsatz der mechanischen Wärmetheorie den Satz auf, dafs Wärme niemals „von selbst“ (d. h. ohne einen entsprechenden Aufwand von anderweitiger Energie) aus einem kälteren in einen wärmeren Körper übergehen kann. Während mechanische Arbeit z. B. durch Reibung, Stofs u. s. w. leicht und vollständig in Wärme umgewandelt werden kann, ist es unmöglich, diese ganze Wärme ebenso vollständig und bedingungslos wieder in Arbeit zurückzuverwandeln, weil dabei immer ein Teil derselben zu kälteren Körpern herabsinkt. Aus dem oben ausgesprochenen Grundsatze hat Clausius durch eigentümliche Betrachtungen, die sich an die Untersuchungsmethode Carnots anschliefsen, eine Gröfsenbeziehung entwickelt für den bei einem Übergang von Wärme von einer höheren auf eine niedrigere Temperatur erzielbaren Arbeitsbetrag. Diese Gröfsenbeziehung ist allerdings keine feststehende Zahl. Das geht schon daraus hervor, dafs der Wärmeübergang überhaupt ohne Arbeitsgewinn verlaufen kann, z. B. bei der Wärmeleitung. Wenn man aber den Vorgang so einrichtet, dafs die Wärme dabei zum Teil in Arbeit verwandelt wird, so läfst sich zeigen, dafs dieser Arbeitsgewinn nicht über einen gewissen Höchstbetrag hinauszugehen vermag, und dafs dieser Höchstbetrag ausschliefslich bedingt ist durch die Anfangs- und die Endtemperatur, zwischen denen der Wärmeübergang stattfindet. Ist nämlich $Q_1$ die Wärmemenge, die von der absoluten Temperatur $T_1$ aus heruntersinkt auf die absolute Temperatur $T_2$, ist $q$ der Anteil dieser

Wärme, der dabei in Arbeit verwandelt wird, und $Q_2$ derjenige Teil. der bei der Temperatur $T_2$ noch als Wärme übrig ist, d.h. $q = Q_1 - Q_2$, so gilt der Satz, daſs $q$ höchstens $= \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot Q_1$ ist. Das Verhältnis der in Arbeit umgewandelten zu der ganzen Wärmemenge $\frac{q}{Q_1}$ nennt man den Nutzeffekt des Prozesses. Wie man aus der Formel ersieht, würde er gleich 1 sein können, d. h. die ganze Wärme würde ohne Rest in Arbeit verwandelt werden können nur dann, wenn $T_2 = 0$ wäre, d. h. wenn die Wärmemenge bis auf die Temperatur des absoluten Nullpunktes heruntersänke. Der durch die Clausiussche Formel bestimmte Höchstbetrag des Nutzeffektes $\frac{T_1 - T_2}{T_1}$ ist aber auch nur unter einer ganz bestimmten Bedingung erreichbar, nämlich bei einem Vorgange, der ebensogut in dem einen Sinne wie in dem entgegengesetzten Sinne ausgeführt werden kann. Man nennt solche Prozesse umkehrbare Prozesse. Die meisten Prozesse sind keine oder nur unvollständig umkehrbare Prozesse. Daher ist der erzielbare Nutzeffekt im allgemeinen stets kleiner als der angegebene Höchstbetrag.

Die Folge der unvollkommenen Rückverwandlung von Wärme in Arbeit ist, daſs die im ganzen Weltall enthaltene mechanische Energie von Tag zu Tag immer mehr in Wärme übergeht, welche sich nach allen Seiten hin verbreitet und die vorhandenen Temperaturunterschiede nach und nach ausgleicht. W. Thomson (1851) nannte diesen Vorgang „Zerstreuung" (Dissipation) oder auch „Herabsetzung" (Degradation) der Energie. Darnach würde das Weltall allmählich und in unabsehbar langer Zeit einem Zustande entgegenstreben, in dem zwar von der ursprünglich vorhandenen Energie nichts verloren gegangen, dieselbe aber in Form von Wärme überall gleichmäſsig verbreitet sein würde. Temperaturunterschiede, diese Grundbedingung für die Zurückverwandlung der Wärme in andere Energieformen, gäbe es nicht mehr, alle mechanische Bewegung müſste aufhören, und der Weltprozeſs wäre damit beendet.

131. **Dampfmaschine.** Das wichtigste Beispiel der Umwandlung von Wärme in Arbeit oder Bewegungsenergie bietet die Dampfmaschine. Ihr wesentlichster Teil ist der Cylinder (Fig. 126), in welchem sich ein dampfdicht schlieſsender Kolben vor- oder rückwärts bewegt, je nachdem der Dampf auf die hintere oder vordere Seite desselben geleitet wird. Die richtige Zuleitung des Dampfes auf die eine oder die andere Seite des Kolbens wird durch die Steuerung vermittelt. Zur Seite des Cylinders befindet sich eine Kammer (rechts in der Figur), in welche der Dampf vom Kessel her in der Richtung des unteren Pfeils einströmt; an der einen Wand der Kammer münden drei Kanäle, von welchen die zwei äuſseren nach den Enden des Cylinders führen, der mittlere dagegen dazu bestimmt ist, den Dampf, nachdem er gewirkt hat, aus dem

Cylinder durch ein (links sichtbares) Rohr austreten zu lassen. Längs jener Wand der Kammer gleitet der muschelartig hohle Schieber, welcher bei seiner jetzigen Stellung den Dampf aus der Dampfkammer durch den oberen Kanal auf die Rückseite des Kolbens gelangen läfst, während der vom vorigen Kolbenschub noch im Cylinder befindliche Dampf durch den unteren Kanal in die Höhlung des Schiebers und von da in den mittleren Kanal und das Austrittsrohr abströmt. Nachdem der Kolben am anderen Ende des Cylinders angekommen ist, wird der Schieber durch Verschiebung nach oben so gestellt, dafs nun der untere Kanal mit dem Dampfraum, der obere dagegen mit der Schieberhöhlung in Verbindung tritt. Die richtige Stellung des Schiebers wird von der Maschine, durch die auf der Achse des Schwungrads befestigte excentrische Scheibe, selbstthätig besorgt. Ist der Schieber so eingerichtet, dafs er den Zuflufs des Dampfes in den Cylinder absperrt, bevor der Kolben seinen ganzen Weg zurückgelegt hat, so leistet der abgesperrte Dampf noch Arbeit, indem er durch seine Ausdehnung den Kolben bis ans Ende des Cylinders schiebt und sich dabei abkühlt. Man nennt derartige Maschinen Expansionsmaschinen. Der aus der Höhlung des Schiebers nach aufsen entweichende Dampf mufs eine geringere Spannkraft haben als der aus dem Dampfraum kommende, und durch den Überdruck des letzteren wird der Kolben fortgeschoben. Bei Maschinen, die mit niedrigem Dampfdruck von etwas mehr als 1 Atmosphäre Spannkraft arbeiten (Niederdruckmaschinen), leitet man daher den entweichenden Dampf in einen von kaltem Wasser umgebenen Raum, den Kondensator, in welchem er durch Abkühlung zum grofsen Teil verdichtet und hiermit seine Spannkraft auf die der Temperatur des Kondensators entsprechende herabgesetzt wird. Läfst man dagegen, wie bei den Hochdruckmaschinen, den Dampf unmittelbar in die Luft entweichen, so dafs auf der einen Seite des Kolbens stets ein Druck von 1 Atmosphäre herrscht, so mufs der arbeitende Dampf eine hohe Spannkraft von 5—12 Atmosphären haben. Da die Hochdruckmaschinen weder eines Kondensators noch der zum Herbei- und Fortschaffen des Kühlwassers dienenden Pumpen bedürfen und demnach viel einfacher gebaut sind als die Niederdruckmaschinen, so wendet man sie besonders da an, wo Raumersparnis geboten ist oder Kühlwasser nicht beschafft werden kann, wie z. B. bei Lokomotiven. Die hin- und hergehende Bewegung des Kolbens wird in eine drehende Bewegung umgesetzt, indem die an dem Kolben befindliche Kolbenstange mittels einer durch ein Gelenk mit ihr verbundenen Schubstange (Pleuelstange) auf eine Kurbel wirkt und dadurch eine mit einem Schwungrad versehene Welle umdreht.

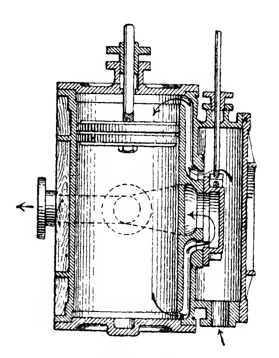


Fig. 126.
Dampfmaschine.

Wenn eine Dampfmaschine arbeitet, so geht ein Teil der dem Dampfkessel zugeführten Wärme an das Kühlwasser oder an die kältere Umgebung über, ein anderer Teil aber verwandelt sich in Arbeit und verschwindet als Wärme; die verschwundene Wärmemenge ist, wie Hirn durch Versuche an Dampfmaschinen nachgewiesen hat (S. 209), der geleisteten Arbeit äquivalent. Das Verhältnis der geleisteten Arbeit zu der ganzen von dem Dampf aufgenommenen Wärmemenge würde nach den Betrachtungen des vorigen Abschnittes höchstens den Wert $\frac{(T_1 - T_2)}{T_1}$ haben, wenn man unter $T_1$ die Temperatur des Kessels, mit der der Dampf in den Cylinder einströmt, unter $T_2$ die des Kondensators, auf die er abgekühlt wird, versteht. Nimmt man die letztere zu 50° an und die erstere zu 180°, entsprechend einer Maschine, die mit 10 Atmosphären Spannung arbeitet, so würde der höchste erreichbare Nutzeffekt $= \frac{130}{453} = 29$ Prozent sein. Noch viel ungünstiger stellt sich das Ergebnis, wenn man nicht die Wärmemenge, die der Dampf aufgenommen hat, sondern die ganze, von der verbrannten Kohle unter dem Kessel erzeugte Wärme in Betracht zieht. Ein Kilogramm Steinkohle erzeugt bei seiner Verbrennung 7500 Kilogrammkalorien Wärme (111). Damit könnten $424 \times 7500$ Meterkilogramm Arbeit geleistet werden, wenn eine vollständige Umwandlung möglich wäre. Eine Maschine von einer Pferdestärke (17) leistet 75 Meterkilogramm in einer Sekunde, also $75 \times 3600$ Meterkilogramm in einer Stunde. Diese Leistung entspricht einer Wärmemenge, die durch Verbrennen von $^{36}/_{424} = 0{,}085$ Kilogramm Kohle erzeugt werden könnte. In Wirklichkeit aber mufs bei den Dampfmaschinen bester Ausführung für jede Pferdekraft-Stunde 0,7 Kilogramm Kohle verbrannt werden. Von der aufgewandten Wärmemenge werden also nur 12 Prozent unter den günstigsten Bedingungen in nutzbare Arbeit übergeführt. Dieses ungünstige Ergebnis ist nicht blofs dadurch bedingt, dafs ein Teil der Wärme in der Feuerungsanlage verloren geht, sondern vor allem dadurch, dafs der Wärmeübergang von der hohen Temperatur der Feuerung auf die sehr viel niedrigere Temperatur des Kessels überhaupt zur Arbeitserzeugung gar nicht benutzt wird. Mit einem wesentlich höheren Nutzeffekte arbeiten daher diejenigen Maschinen, bei denen die Verbrennung in dem Arbeitscylinder selbst stattfindet, wie die Gas-, Petroleum- und Benzinmotoren.

# VI. Magnetismus.

132. **Magnetismus.** Manche Stücke eines in der Natur vorkommenden Eisenerzes, des Magneteisensteins (Eisenoxyduloxyd, $Fe_3 O_4$), besitzen die Eigenschaft, Eisenteilchen anzuziehen und festzuhalten. Man nennt diese Eigenschaft Magnetismus, und ein Stück jenes Eisenerzes, welches sie besitzt, heifst ein natürlicher Magnet. Durch Berühren oder Bestreichen mit einem Magnet kann man den Magnetismus vorübergehend auf Eisen und dauernd auf Stahl übertragen und letzteren dadurch zu einem künstlichen Magnet machen (Magnetisirung). Bestreut man einen magnetisch gemachten Stahlstab (Magnetstab) mit Eisenfeile, so bleibt dieselbe, Bärte bildend, vorzugsweise an seinen Enden hängen, während gegen die Mitte hin immer weniger und in der Mitte selbst gar keine Eisenfeile haftet; die beiden Punkte in der Nähe der Enden, nach welchen die Anziehungskraft gerichtet ist, nennt man die Pole, die Mitte, wo keine Anziehung stattfindet, den Äquator (neutrale oder indifferente Stelle) des Magnets; die Verbindungslinie der beiden Pole heifst die magnetische Achse.

Wird ein Magnetstab in seiner Mitte an einem Coconfaden aufgehängt, so dafs er sich in wagrechter Ebene drehen kann, so stellt sich seine Achse vermöge einer Einwirkung, welche die Erde als Ganzes auf ihn ausübt, in eine Richtung ein, welche von der Südnordrichtung (dem geographischen Meridian) nur wenig abweicht: derjenige seiner Pole, welcher sich stets nach Norden wendet, heifst deshalb der Nordpol, der andere der Südpol.

Nähert man dem aufgehängten Magnetstab einen zweiten, so zeigen Nord- und Südpol auch in der Weise ein entgegengesetztes Verhalten, dafs gleichnamige Pole sich abstofsen, ungleichnamige sich anziehen.

133. **Molekularmagnete.** Bricht man einen Magnet (z. B. eine magnetisirte Stricknadel) mitten entzwei, so bildet jedes Bruchstück wieder einen vollständigen Magnet mit zwei ungleichnamigen Polen, indem an der Trennungsstelle zwei neue Pole entstehen, deren jeder mit dem bereits vorhandenen des zugehörigen Bruchstücks ungleichnamig ist. Wie weit man diese Teilung auch fortsetzen mag, jedes noch so kleine Bruchstück eines Magnets erweist sich wieder als vollständiger Magnet mit zwei gleich starken Polen. Dieses Verhalten berechtigt zu der Annahme, dafs jedes kleinste Teilchen oder Molekül eines Magnets selbst schon ein Magnet mit zwei entgegen-

gesetzten Polen, ein „Molekularmagnet“, sei. Diese Annahme enthält keinen Widerspruch gegen die Thatsache, daſs die magnetische Wirkung nur an den Enden eines Magnetstabes sich offenbart, sondern gibt davon vielmehr befriedigende Rechenschaft. Denkt man sich nämlich der Einfachheit wegen, ein dünnes Magnetstäbchen bestehe nur aus einer einzigen Reihe von Molekularmagnetchen, deren gleichnamige Pole alle nach derselben Seite gewendet sind, so werden überall auf der ganzen Länge des Stabes zwei entgegengesetzte Pole der benachbarten Molekularmagnete zusammenstoſsen, deren anziehende und abstoſsende Wirkungen nach auſsen hin sich gegenseitig aufheben, und nur an den beiden Enden des Stabes werden die freien Pole der äuſsersten Moleküle wirksam bleiben.

134. **Magnetische Influenz. Koërcitivkraft. Sättigung.** Nähert man den Nordpol eines Magnets einem Stück weichen Eisens, so wird dasselbe sofort selbst zu einem Magnet, indem es an seinem näheren Ende einen Südpol, am entfernteren einen Nordpol bekommt, und vermag jetzt selbst wieder ein zweites, dieses ein drittes etc. Eisenstückchen anzuziehen und zu tragen. Das Eisen wird vom Magnet eben darum angezogen, weil es unter seinem Einfluſs (durch Influenz oder nach englischer Ausdrucksweise durch „Induktion“) selbst zu einem Magnet wird, welcher dem genäherten Magnetpol seinen ungleichnamigen Pol zuwendet. Der Magnetismus des weichen Eisens verschwindet wieder, und die von ihm getragenen Eisenstückchen fallen ab, wenn der influenzirende Magnetpol wieder entfernt wird, oder überhaupt, sobald die magnetisirende Kraft aufhört. Anders verhält sich der Stahl: er wird nicht so leicht magnetisch wie das weiche Eisen; ist er es aber durch anhaltende Einwirkung eines Magnets geworden, so bleibt er magnetisch, auch wenn er von diesem getrennt wird. Die Kraft, mit welcher der Stahl der Magnetisirung widersteht, heiſst die Koërcitivkraft. Sie ist am gröſsten beim härtesten und sprödesten Stahl; beim Anlassen nimmt sie ab und wird durch Erhitzung bis zur Rotglut und allmähliche Abkühlung so gering wie beim weichen Eisen.

Um die Erscheinungen der magnetischen Influenz zu erklären, nimmt man an, daſs auch jedes unmagnetische Eisen- oder Stahlstück aus bereits fertig gebildeten Molekularmagneten bestehe, welche jedoch derart regellos gelagert sind, daſs nach jeder Richtung ebenso viele Nord- wie Südpole sich wenden und deshalb ihre anziehenden und abstoſsenden Wirkungen gegenseitig aufheben. Bei Annäherung eines Magnetpols drehen sich nun die Molekularmagnete so um ihre Schwerpunkte, daſs sie dem influenzirenden Magnetpol ihre ungleichnamigen Pole zuwenden, und eben durch diese gleichsinnige Anordnung der Mehrzahl oder aller Molekularmagnete wird das Eisen- oder Stahlstück zu einem nach auſsen wirksamen Magnet. Während im Stahl die Moleküle der Drehung einen beträchtlichen mit der Reibung vergleichbaren Widerstand (die Koërcitivkraft) entgegensetzen, dagegen aber auch die geordnete Lage ebenso hartnäckig be-

haupten, kehren die Moleküle des weichen Eisens ebenso leicht wieder in ihre frühere ungeordnete Lage zurück, wie sie dieselbe durch Influenz verlassen haben. Jedes Eisen- oder Stahlstück kann nur bis zu einem gewissen Grad, bis zur Sättigung, magnetisch gemacht werden, welche dann erreicht ist, wenn sämtliche Molekularmagnete in gleichem Sinne gerichtet sind. Für diese Vorstellung spricht vor allem der Umstand, dafs Erschütterungen (Klopfen mit einem Hammer) während der Einwirkung der magnetisirenden Kraft die Magnetisirung eines Eisen- oder Stahlstabes erleichtern und ebenso die Entmagnetisirung befördern, wenn der Stab nicht mehr der Einwirkung einer magnetisirenden Kraft unterliegt.

135. **Formen der Magnete. Anker. Tragkraft.** Die gebräuchlichsten Formen sind: der gerade parallelepidische oder cylindrische Magnetstab; die Magnetnadel (Fig. 127), ein flaches Magnetstäbchen, welches gewöhnlich die Form einer langgestreckten

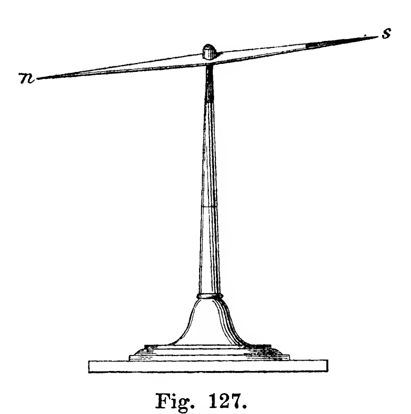



Fig. 127.
Magnetnadel.

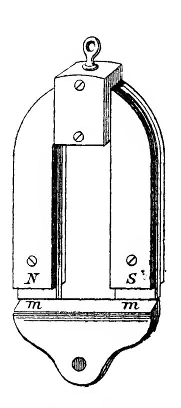



Fig. 128.
Hufeisenmagnet mit Anker.

Raute hat und in der Mitte mit einem Hütchen aus Achat versehen ist, womit die Nadel drehbar auf eine Stahlspitze aufgesetzt werden kann; ferner der Hufeisenmagnet, dessen Pole, damit sie gleichzeitig wirken können, nebeneinander liegen. An die Pole wird ein Stück weiches Eisen, der Anker oder die Armatur (*mm*, Fig. 128), gelegt, welches durch Influenz selbst zu einem Magnet wird, der an den Polen des Hufeisenmagnets mit seinen ungleichnamigen Polen anliegt; da zur Bildung des Südpols des Ankers nicht nur der Nordpol *N*, sondern auch der Südpol *S* des Magnets beiträgt, so ist die Magnetisirung des an beiden Polen anliegenden Ankers ungleich stärker, als wenn sie nur von einem Pole herrührte. Da jeder Pol des Ankers bestrebt ist, die Moleküle des Magnets in ihrer Richtung zu erhalten, hat der Anker die Wirkung, eine Schwächung des Magnets zu verhindern; man sagt, der Magnet ist in sich „geschlossen“.

Gröſsere Magnete werden der besseren Durchmagnetisirung wegen aus einzelnen hufeisenförmigen Stahlplatten verfertigt, die man mit gleichnamigen Polen aufeinander legt und zusammenschraubt; einen so zusammengesetzten Magnet (Fig. 128) nennt man ein magnetisches Magazin (Lamellenmagnet, Blättermagnet).

Die Tragkraft eines Magnets, welche man durch Belasten des Ankers mit Gewichten erprobt, wächst keineswegs im nämlichen Verhältnis wie seine Masse, sondern weit langsamer; sie ist nach Häcker (1842) der Kubikwurzel aus dem Quadrate seines Gewichts proportional. Während ein 60 g schwerer Magnet das 25fache seines Gewichts trägt, vermag einer von 50 kg nicht einmal das Dreifache und einer von 1000 kg kaum noch sein eigenes Gewicht zu tragen.

136. **Magnetisirungsmethoden.** Wegen der groſsen Koërcitivkraft des Stahles reicht die bloſse Berührung mit einem Magnet zu seiner kräftigen Magnetisirung nicht hin, sondern öfteres Bestreichen ist erforderlich, indem man z. B., in der Mitte beginnend, mit der einen Hälfte des zu magnetisirenden Stabes oder Hufeisens 10—20 mal über den Nordpol, mit der anderen ebenso oft über den Südpol eines kräftigen Magnets hinstreicht; natürlich erhält die am Nordpol gestrichene Hälfte einen Südpol, und umgekehrt. Die verschiedenen künstlichen Strichmethoden, welche ersonnen wurden, um Stahlmagnete bis zur Sättigung zu magnetisiren, haben ihre Bedeutung verloren, seit man nach Entdeckung des Elektromagnetismus (s. u.) über ungleich gröſsere magnetisirende Kräfte als früher gebietet.

137. **Erdmagnetismus.** Hängt man in einiger Entfernung über einer Magnetnadel, welche sich unter dem Einfluſs der Erde eingestellt hat, einen Magnetstab auf, so wird sich derselbe zur Nadel parallel stellen, und beide, Stab und Nadel, werden mit ihren Nordpolen nach Norden weisen. Wird die Nadel aus ihrer Stellung seitlich abgezogen und wieder losgelassen, so kehrt sie rasch wieder dahin zurück. Senkt man nun den Magnetstab allmählich herab, so bemerkt man, daſs bei einer gewissen Höhe des Stabes über der Nadel letztere das Bestreben, sich einzustellen, verliert und, wenn sie seitwärts abgezogen wird, nicht mehr in ihre frühere Stellung zurückkehrt. Senkt man den Magnetstab noch tiefer, so kehrt die Nadel ihre Stellung um und zeigt mit ihrem Nordpol nach Süden. Aus diesem Versuch geht hervor, daſs die Wirkung der Erde auf die Magnetnadel durch einen in geeigneter Entfernung angebrachten Magnet aufgehoben werden kann. Nähert man, wenn dies erreicht ist, der Magnetnadel einen Magnetstab, dessen Südpol nach Norden gerichtet ist, so bemerkt man, daſs ihr Bestreben, sich mit dem Nordpol nach Norden zu wenden, zurückkehrt und bei einer gewissen Entfernung dieses zweiten Stabes dieselbe Gröſse erlangt wie bei alleiniger Wirkung der Erde. Daraus geht hervor, daſs die Erde wie ein Magnet wirkt, dessen Nordpol nach Süden gewendet ist, und

demnach selbst als ein grofser Magnet (Gilbert, 1600) anzusehen ist, dessen Pole übrigens von den Magneten, mit welchem wir Versuche anstellen, so weit entfernt sind, dafs die von einem derselben auf die Pole einer Magnetnadel ausgeübten Kräfte einander gleich und entgegengesetzt sind (Kräftepaar) und demnach nicht etwa eine fortschreitende Bewegung der Magnetnadel nach dem magnetischen Erdpol hin, sondern nur die Einstellung derselben in eine bestimmte Richtung bewirken können (Erdmagnetismus, tellurischer Magnetismus).

138. **Astasie.** Eine Magnetnadel, welche in der vorhin angegebenen Weise durch Annäherung eines Magnets mit gleichliegenden Polen der Wirkung des Erdmangnetismus entzogen ist, so dafs sie nun jedem Antrieb frei zu folgen vermag, heifst astatisch (d. h. „ohne bestimmte Einstellung“). Denselben Erfolg erreicht man auch dadurch, dafs man zwei gleich starke Magnetnadeln

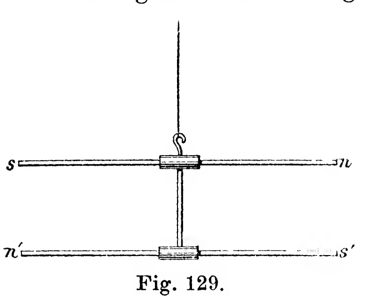


Fig. 129.
Astasisches Nadelpaar.

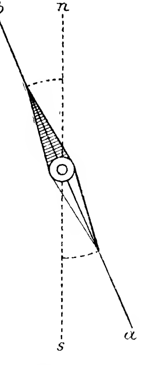


Fig. 130.
Deklination.

(Fig. 128) so übereinander befestigt, dafs die ungleichnamigen Pole übereinander liegen, und dieses astatische Nadelpaar nun frei schweben läfst.

139. **Magnetischer Meridian. Deklination.** Die Vertikalebene, welche man sich durch die Achse $ab$ (Fig. 130) einer in horizontaler Ebene drehbaren Magnetnadel gelegt denkt, nachdem sich diese unter der Wirkung des Erdmagnetismus eingestellt hat, nennt man den magnetischen Meridian; sie bildet mit der genauen Südnordlinie oder dem geographischen Meridian $sn$ einen Winkel, welcher die magnetische Deklination oder Abweichung (Columbus, 1492) heifst. Die Deklination hat an verschiedenen Orten der Erdoberfläche ungleiche Werthe und wird als östlich oder westlich bezeichnet, je nachdem das Nordende der Nadel nach Osten oder nach Westen von der Südnordlinie abweicht. In unseren Gegenden ist die Deklination westlich und betrug anfangs 1902 in Berlin $9{,}5^0$, in München $10{,}3^0$, in Paris $14{,}7^0$, mit einer jährlichen Abnahme von $0{,}1^0$.

Einen Überblick über die Verhältnisse der magnetischen Abweichung auf der Erdoberfläche gewährt die Deklinationskarte

(Fig. 131), auf welcher alle Orte gleicher Abweichung durch Linien verbunden sind; diese Linien gleicher Deklination nennt man Isogonen (Halley, 1700). Alle Isogonen laufen in zwei Punkten zusammen, von denen der eine im nordamerikanischen Eismeer in der Nähe der Melvillehalbinsel, der andere im südlichen Eismeer südlich von Australien liegt, und welche als die magnetischen Pole der Erde anzusehen sind. Eine Linie ohne Abweichung, d. h. eine solche, auf welcher die Magnetnadel genau nach Norden zeigt, geht durch Brasilien, läuft im Osten von Westindien durch den Atlantischen Ozean, um in der Gegend von Kap Hatteras in Nordamerika einzutreten und die Hudsonsbai zu durchlaufen. Dann geht sie durch den nördlichen Magnetpol der Erde, trifft Europa

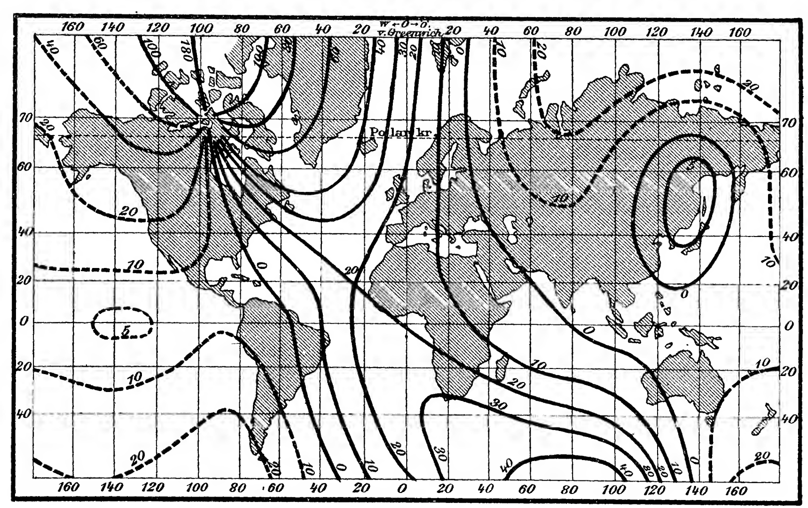



Fig. 131.
Deklinationskarte für 1885.

östlich vom Nordkap, berührt das Schwarze Meer, durchsetzt westlich von Vorderindien den Indischen Ozean, wendet sich sodann nach Australien, um endlich durch den südlichen Magnetpol der Erde in sich selbst zurückzulaufen. Auf dem Atlantischen Ozean, in Europa und Afrika ist die Abweichung überall eine westliche; auf der anderen, durch die beschriebene Linie abgegrenzten Erdhälfte ist sie eine östliche, mit Ausnahme eines begrenzten Gebietes im östlichen Asien, wo eine zweite, in sich selbst zurücklaufende Linie ohne Abweichung vorkommt, in deren Innern die Deklination wieder westlich ist.

Jede zur Messung der Deklination bestimmte Vorrichtung heifst Deklinatorium. Einen einfachen Apparat dieser Art zeigt Fig. 132. Inmitten eines in Grade geteilten Kreises spielt eine Magnetnadel auf einer Spitze; an der Seite des Gehäuses, welches um eine lot-

rechte Achse gedreht werden kann, ist ein Fernrohr angebracht, dessen Achse mit dem Durchmesser 0—180° des Teilkreises parallel läuft. Hat man den Apparat so gestellt, daſs die Nadel auf 0 zeigt, so fällt die Achse des Fernrohrs in den magnetischen Meridian; richtet man dagegen das Fernrohr genau nach Nord oder Süd, so gibt die Spitze der Nadel auf dem Teilkreis die magnetische Abweichung an. Das Instrument wird in der Feldmeſskunst als Bussole zu Winkelmessungen gebraucht, indem die Magnetnadel stets den Winkel angibt, welchen die Visirrichtung des Fernrohrs mit dem magnetischen Meridian bildet.

Der Kompaſs (Chinesen, 2300 v. Chr.), welcher den Seefahrern zur Orientirung auf dem Meere dient, besteht aus einer auf einer Spitze schwebenden Magnetnadel, welche eine auf ihr befestigte kreisrunde Papierscheibe (Windrose) trägt, deren Umfang, vom Nordpol der Nadel beginnend, in 32 Teile (Kompaſsstriche) geteilt ist; das Ganze befindet sich in einem in Ringaufhängung frei schwebenden Gehäuse.

140. **Inklination.** Wird eine Magnetnadel, welche um eine wagrechte, durch ihren Schwerpunkt gehende Achse drehbar ist (Fig. 133), so aufgestellt, daſs ihre Drehungsebene in den magnetischen Meridian fällt, so neigt sie sich auf der nördlichen Halbkugel der Erde mit ihrem Nordpol, auf der südlichen mit dem Südpol nach abwärts. Der Winkel, unter welchem sie zur wagrechten Ebene geneigt ist,

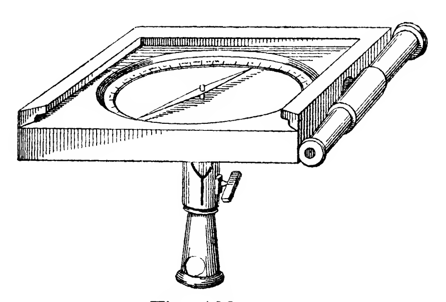


Fig. 132.
Deklinationsbussole.

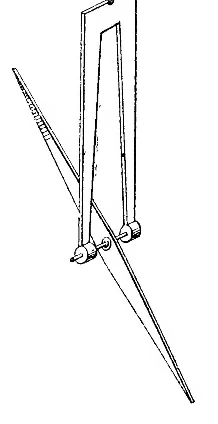


Fig. 133.
Inklination.

heiſst die magnetische Neigung oder Inklination (Hartmann, 1544). Diese Neigung betrug anfangs 1902 in Berlin 66,5°, in München 63,4°, in Paris 64,8° und nimmt in jedem Jahre um 0,03° ab. Weiter nach Norden nimmt die Neigung zu; über dem nördlichen Magnetpol der Erde, welchen Kapitän Ross unter 70° 5′ nördl. Br. und 96° 46′ westl. L. v. Gr. wirklich erreicht hat, stellt sich die Nadel lotrecht, weshalb der Schiffskompaſs in diesen hohen Breiten unbrauchbar wird. Nach Süden hin wird die Neigung geringer, in der Nähe des Erdäquators stellt sich die Nadel wag-

recht, um auf der südlichen Erdhälfte ihren Südpol immer mehr herabzusenken, je weiter man gegen den südlichen Magnetpol vor-

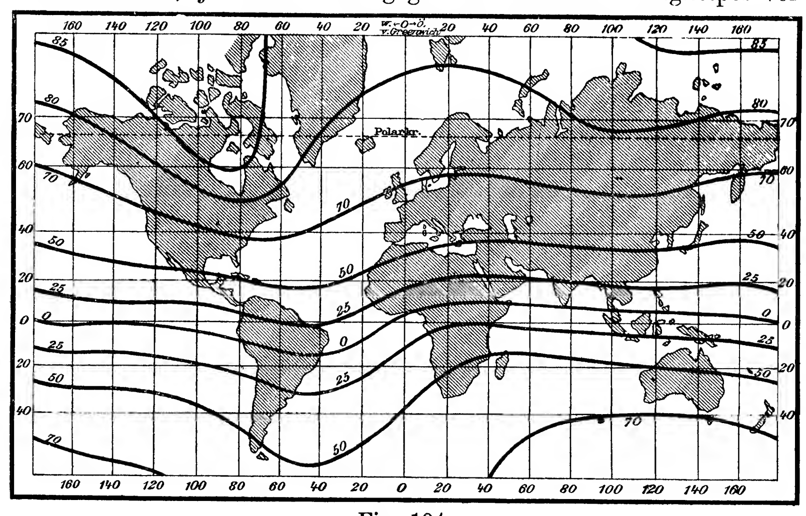



Fig. 134.
Inklinationskarte für 1885.

dringt. Die Verteilung der Inklination wird veranschaulicht durch die Inklinationskarte (Fig. 134; Hansteen, 1826), auf der die Orte mit gleicher Inklination durch je eine krumme Linie verbunden sind; diese Linien werden Isoklinen genannt. Die Nullisokline, längs welcher die Inklinationsnadel wagrecht steht, verläuft in der Tropenzone teils diesseits, teils jenseits des geographischen Äquators; sie wird der magnetische Äquator der Erde genannt. Zur Bestimmung der Inklination kann das Inklinatorium (Fig. 135; Normann, 1576) dienen, dessen Einrichtung ohne weitere Erklärung verständlich ist.

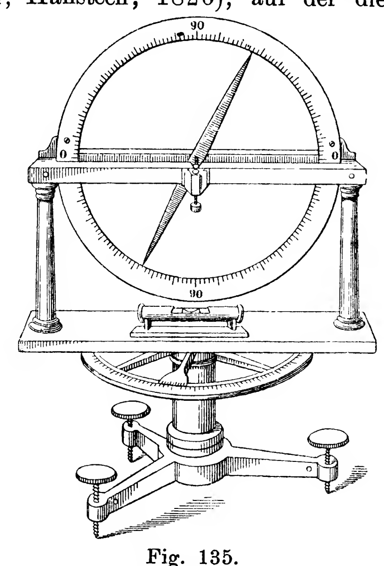



Fig. 135.
Inklinatorium.

141. **Intensität des Erdmagnetismus.** Die Stellung der Inklinationsnadel gibt die Richtung an, nach der an jedem Orte die erdmagnetische Kraft wirkt, gerade so wie ein ruhendes Pendel die Richtung der Schwerkraft angibt. Entfernt man eine Magnetnadel, sei es eine Inklinations- oder eine Deklinationsnadel, ein wenig aus

ihrer Gleichgewichtslage, so kehrt sie dahin zurück, nachdem sie eine Reihe von Schwingungen vollführt hat, welche genau dieselben Gesetze befolgen wie die Schwingungen eines Pendels. Läſst man ein und dieselbe Magnetnadel an verschiedenen Orten der Erdoberfläche schwingen, so kann man aus der Anzahl der Schwingungen, welche sie in einer Sekunde macht, auf das Verhältnis der erdmagnetischen Kräfte an diesen Orten schlieſsen; diese Kräfte verhalten sich nämlich wie die Quadrate der beobachteten Schwingungszahlen (40). Aus den Schwingungen einer Inklinationsnadel würde man auf diese Weise die ganze erdmagnetische Kraft oder die **totale Intensität** kennen lernen, während auf die Deklinationsnadel nur der wagrecht gerichtete Anteil der ganzen Kraft, oder die **horizontale Intensität** einwirkt. Da jedoch eine Deklinationsnadel genauere Beobachtungen zuläſst

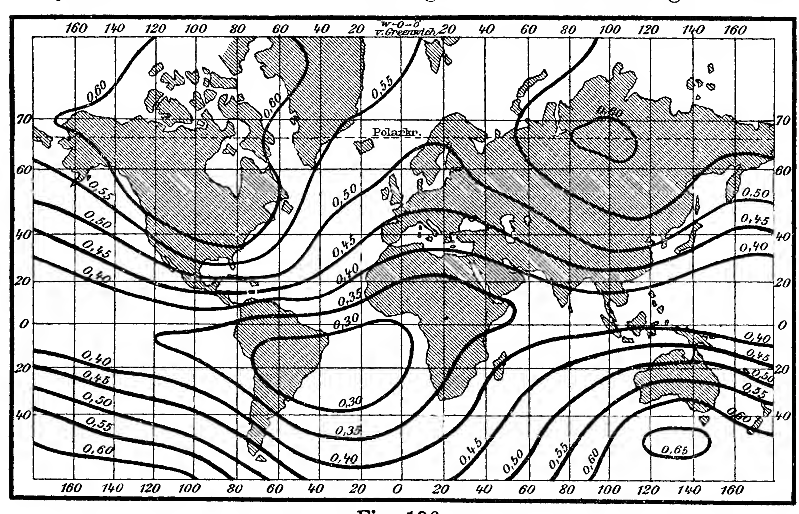



**Fig. 136.**
Isodynamische Linien für 1885.

als eine Inklinationsnadel, so zieht man es vor, mit Hilfe der ersteren nur die horizontale Intensität ($H$) unmittelbar zu bestimmen und daraus die totale Intensität ($T$) mit Rücksicht auf die bekannte Inklination ($i$) zu berechnen ($H = T \cos i$). Die Verteilung der totalen erdmagnetischen Kraft über die Erdoberfläche wird zur Anschauung gebracht durch die Linien gleicher Intensität oder die **Isodynamen**; das Kärtchen (Fig. 136) zeigt, daſs die erdmagnetische Kraft im allgemeinen vom Äquator gegen die Pole hin zunimmt; den gröſsten Wert erreicht sie jedoch nicht an den magnetischen Polen selbst, sondern auf der nördlichen Halbkugel finden wir zwei Punkte höchster magnetischer Kraft, den einen in Nordamerika etwas westlich von der Hudsonsbai, den anderen im nördlichen Asien. Den beigeschriebenen Zahlen liegt eine später zu erläuternde Einheit zu Grunde. Die Horizontalintensität betrug in dieser Einheit anfangs 1902 in Berlin

0,189, in München 0,206, in Paris 0,197; sie wächst jährlich um etwa 0,0002.

142. **Variationen.** Die drei Gröfsen: Deklination, Inklination und Intensität werden die Elemente des Erdmagnetismus genannt, weil durch sie Richtung und Gröfse der erdmagnetischen Kraft vollständig bestimmt sind. Sämtliche Elemente des Erdmagnetismus behalten auch an ein und demselben Orte nicht den nämlichen Wert, sondern sind Schwankungen unterworfen, welche teils unregelmäfsig und plötzlich eintreten, teils regelmäfsig täglich oder im Kreislauf vieler Jahre wiederkehren; erstere nennt man Störungen, letztere Variationen. Die täglichen Variationen stehen mit dem täglichen Gang der Sonne in Beziehung; sie betragen nur wenige Minuten. Die säkularen Variationen dagegen können, indem sie im Laufe der Jahre in gleichem Sinne fortschreiten, allmählich zu beträchtlicher Gröfse anwachsen. So war z. B. in Frankreich 1580 die Deklination 11,5° östlich, war 1663 gleich Null, wurde sodann westlich bis zu 22,5° im Jahre 1814; seitdem nimmt die westliche Deklination wieder ab. Auch die Inklination zeigt sowohl tägliche als säkulare Änderungen; in Paris war sie 1671 noch 75°, seitdem nimmt sie ab und betrug 1894 nur noch 65,1°. Ebenso ist die Intensität sowohl täglichen als säkularen Variationen unterworfen.

Von den Störungen weifs man, dafs sie mit Erdbeben und vulkanischen Ausbrüchen, namentlich aber mit der Erscheinung des Nordlichtes, im Zusammenhange stehen. Aufserdem hat man eine ungefähr 11 jährige Periodizität in den Schwankungen der erdmagnetischen Elemente herausgefunden, die auf einen eigentümlichen Zusammenhang dieser Erscheinungen mit der ebenfalls in einer 11 jährigen Periode schwankenden Häufigkeit der Sonnenflecken hinzuweisen scheint.

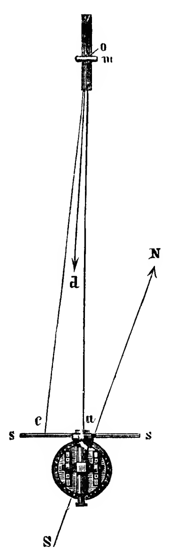


Fig. 137.
Magnetometer.

143. **Magnetometer.** Zur genauen Bestimmung der Deklination und ihrer Variationen dient das Magnetometer (Gaufs, 1833). An ungedrehten Seidenfäden ist ein Magnetstab *m* (Fig. 136) in horizontaler Ebene drehbar aufgehängt; über seiner Mitte senkrecht zur magnetischen Achse des Stabes ist ein kleiner Spiegel *o* an ihm befestigt. In dem Spiegel erblickt man durch ein um die Mitte eines horizontalen Kreises drehbares Fernrohr (Theodolith) das Spiegelbild eines unter dem Fernrohr angebrachten wagrechten, in Millimeter geteilten Mafsstabes *s s*, und zwar in der Mitte des Gesichtsfeldes (am Fadenkreuz) den mittleren Teilstrich *a* des Mafsstabes, wenn die magnetische Achse des Magnetstabes mit der Absehlinie (Achse) des Fernrohrs zusammenfällt. Weicht der Magnetstab aber ein wenig

von dieser Lage ab, so erscheint ein anderer Teilstrich $c$ am Fadenkreuz. Aus der so abgelesenen Strecke $ac$ und der Entfernung $am$ läſst sich der kleine Winkel $amd$, um welchen die Magnetachse von der Linie $am$ abweicht, mit groſser Genauigkeit bestimmen, und dann auch mittels des horizontalen Teilkreises der Winkel der Magnetachse mit der bekannten Richtung NS des astronomischen Meridians, d. i. die Deklination.

144. **Coulombs Gesetz.** Nähert man einer kleinen an einem Coconfaden horizontal schwebenden Magnetnadel, welche dem Einfluſs des Erdmagnetismus entzogen (astatisch) ist, den einen Pol eines sehr langen Magnetstabes, dessen anderer Pol so weit entfernt ist, daſs seine Wirkung auf die Nadel auſser acht gelassen werden kann, so schwingt die Magnetnadel, bis sie sich in ihre Gleichgewichtslage einstellt, nach denselben Gesetzen wie ein Pendel. Aus den Schwingungszahlen, welche man bei verschiedenen Entfernungen des Poles beobachtet, kann man auf das Verhältnis der Kräfte schlieſsen, welche der genäherte Pol auf die Pole der Nadel ausübt; diese Kräfte verhalten sich nämlich wie die Quadrate der Schwingungszahlen (40). So ergibt sich, daſs die Kraft, mit welcher zwei Magnetpole sich gegenseitig anziehen oder abstoſsen, dem Quadrat ihrer Entfernung umgekehrt proportional ist (Coulomb, 1785). Coulomb hat dieses Gesetz auch noch mit der Drehwage (S. 81) nachgewiesen.

Die Kraft zwischen zwei Magnetpolen ist auſserdem noch von ihrer Stärke bedingt. Man schreibt einem Pole die doppelte Stärke zu, wenn er auf dieselbe Magnetnadel in derselben Entfernung die doppelte Kraft ausübt, d. h. man nimmt an, daſs Kraft und Polstärke einander proportional seien. Die Wechselwirkung zweier Magnetpole ist demnach dem Produkt ihrer Polstärken proportional.

Als (absolute) Einheit der Polstärke wurde diejenige festgesetzt, welche auf einen gleich starken Pol in der Entfernung 1 (1 cm) die Kraft 1 (1 Dyne) ausübt (12).

Hiernach ergibt sich für die Kraft $F$, welche zwischen zwei Magnetpolen von den Stärken $m$ und $m'$ in der Entfernung $r$ (cm) wirksam ist, in Dynen ausgedrückt:

$$F = \frac{m m'}{r^2},$$

wobei die Polstärke als positiv oder negativ gerechnet wird, je nachdem der Pol ein Nord- oder Südpol ist. Statt Polstärke sagt man auch „Magnetismusmenge“.

145. **Magnetfeld. Kraftlinien. Niveauflächen.** Der Raum um einen Magnet, innerhalb dessen sich seine magnetische Wirkung äuſsert, heiſst das magnetische Feld. Für jeden Punkt des Feldes kann vermöge des Coulombschen Gesetzes die Kraft angegeben werden, welche auf einen dort befindlichen Magnetpol von

der Polstärke 1 wirkt. Diese Kraft heifst die **Feldstärke** in diesem Punkte.

Eine kleine um ihre Mitte allseitig drehbare Magnetnadel stellt sich in jedem Punkte des Feldes in die Richtung der dort herrschenden Kraft ein. Führt man sie stets in der Richtung, nach welcher sie mit ihrem Nordpol weist, durch das Feld weiter, so beschreibt ihre Mitte eine (im allgemeinen krumme) Linie, eine **Kraftlinie**, welche vom Nordpol des Magnets aus nach seinem Südpol geht und welche man sich innerhalb des Magnets nach dem Nordpol zurückkehrend denken kann. Denn wenn man sich den Magneten quer durchgebrochen und die beiden Teile ein wenig auseinandergerückt denkt, so würde in dem schmalen Zwischenraume eine Wirkung vorhanden sein, wie sie durch die vom Südpol durch den Magnet nach dem Nordpol verlaufenden Kraftlinien charakterisirt ist. In diesem Sinne bildet jede Kraftlinie eine geschlossene Kurve, die in jedem ihrer Punkte die Richtung der magnetischen Kraft angibt. Man kann die Kraftlinien im Felde eines Magnets sichtbar machen, wenn man auf ein über ihn gebreitetes Blatt steifen Papiers Eisen-

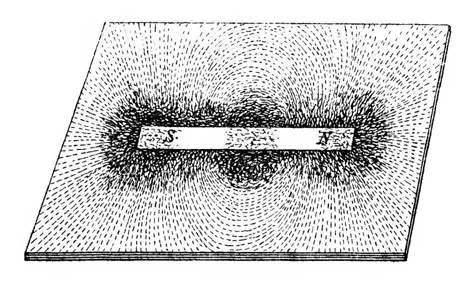



Fig. 138.

feilspäne siebt. Die Spänchen werden unter dem Einflufs des Magnets selbst zu kleinen Magneten, die sich längs der Kraftlinien aneinander reihen (Fig. 138). Da die Magnetchen ihre ungleichnamigen Pole einander zuwenden, so entsteht durch ihre gegenseitige Anziehung eine Spannung längs der Kraftlinie; da ferner die Magnetchen zweier benachbarter Kraftlinien, weil hier gleichnamige Pole nebeneinander liegen, sich abstofsen, so entsteht ein Druck quer zu den Kraftlinien, der sie auseinanderzudrängen sucht. Stellen wir uns vor, dafs jene Längsspannung und dieser Querdruck auch im freien Felde bestehe, indem auch das den Magneten umgebende Mittel ebenso wenn auch schwächer wie die Eisenfeilspäne magnetisirbar wäre, so läfst sich die Anziehung ungleichnamiger Pole auffassen als Folge der Längsspannung der sie verbindenden Kraftlinien, und die Abstofsung zweier gleichnamiger Pole als die Wirkung des Querdrucks, mit welchem sich die im Felde zwischen den Polen nahezu parallelen Kraftlinien voneinander wegzudrängen suchen.

Legt man einem Pol, z. B. dem Nordpol $N$ (Fig. 138), gegen-

über ein Stück weiches Eisen, so werden die von $N$ ausstrahlenden Kraftlinien nach dem genäherten Ende des Eisens hin zusammengezogen, und treten, nachdem sie das Eisen durchsetzt haben, am anderen Ende divergirend wieder aus. Dieser Verlauf der Kraftlinien führt zu der Vorstellung, daſs das Eisen dem Durchgang der Kraftlinien einen geringeren Widerstand entgegensetzte oder für sie eine gröſsere Durchlässigkeit (Permeabilität) oder Leitfähigkeit besitze als die umgebende Luft, und sie deshalb in sich hineinzieht und verdichtet. — Dort, wo die Kraftlinien in das Eisen eintreten, erhält es einen Südpol, hier, wo sie austreten, einen Nordpol.

Flächen, welche die das Magnetfeld durchziehenden Kraftlinien überall senkrecht durchschneiden, heiſsen Niveauflächen. Längs ihrer Oberfläche herrscht keine magnetische Kraft und kann daher ein Magnetpol ohne Arbeitsaufwand verchoben werden. Dagegen muſs Arbeit geleistet werden, um einen Magnetpol der magnetischen Kraft entgegen von einer Niveaufläche auf eine andere zu schaffen. Durch die Kraftlinien samt den Niveauflächen wird die Beschaffenheit eines Magnetfeldes übersichtlich dargestellt.

Durch jeden Punkt einer Niveaufläche kann man sich eine Kraftlinie gezogen denken. Jedes Stückchen einer Niveaufläche wird also gewissermaſsen von unendlich vielen Kraftlinien getroffen. Man kann die Darstellung eines Magnetfeldes durch Kraftlinien aber auch benutzen, um nicht bloſs die Richtung, sondern auch die Gröſse der Kraft an jeder Stelle des Feldes zu veranschaulichen. Zu diesem Ende denkt man sich durch jedes Stückchen der Niveaufläche nur eine beschränkte Anzahl von Kraftlinien gezogen und zwar so viele, daſs durch die Flächeneinheit ebenso viele Kraftlinien hindurchgehen, wie die Anzahl der üblichen Einheiten beträgt, durch die die magnetische Kraft an der betreffenden Stelle ausgedrückt wird. Die Feldstärke wird alsdann ausgedrückt durch die Zahl der Kraftlinien pro Flächeneinheit, oder durch die Dichte der Kraftlinien.

Ein Magnetfeld, in welchem die magnetische Kraft auf die Polstärke 1 (die Feldstärke) überall gleich und gleichgerichtet ist, in welchem also alle Kraftlinien unter sich parallel laufen, heiſst gleichartig oder homogen. Das magnetische Feld der Erde kann an jedem Orte innerhalb nicht zu weiter Ausdehnung als gleichartig angesehen werden; seine Kraftlinien sind parallel der Inklinationsrichtung, seine Feldstärke gleich der örtlichen Totalintensität.

In absolutem Maſse (cm, g, sec) ausgedrückt beträgt die Totalintensität des erdmagnetischen Feldes in Deutschland ca. 0,5. Will man sich diese Feldstärke durch ein Kraftlinienbild veranschaulichen, so muſs man sich ein Bündel paralleler Geraden von der Richtung der Inklinationsnadel vorstellen, die in gleichmäſsigen Abständen so verteilt sind, daſs auf je 2 Quadratcentimeter einer zu ihnen senkrechten Ebene je eine Linie entfällt.

Die Kraftlinien der Horizontalintensität würde man finden, wenn man auf der Erdoberfläche von einem beliebigen Punkt aus, immer der Richtung der Deklinationsnadel folgend, fortschritte. Die so erhaltenen Linien, welche man magnetische Meridiankurven nennt, laufen von einem magnetischen Pol der Erde zum andern. Sie sind in Fig. 139 dargestellt und geben, wie man sieht, besser noch als

die Isogonen, ein deutliches Bild von der Verteilung der erdmagnetischen Kraft auf der Erdoberfläche. Die senkrecht dazu gezeichneten Linien sind die Schnitte der Niveauflächen mit der Erdoberfläche.

146. **Magnetisches Moment.** In einem homogenen Feld werden die Pole eines Magnetstabes von entgegengesetzt parallelen gleichen Kräften angegriffen, die ein Kräftepaar bilden, das nur eine drehende,

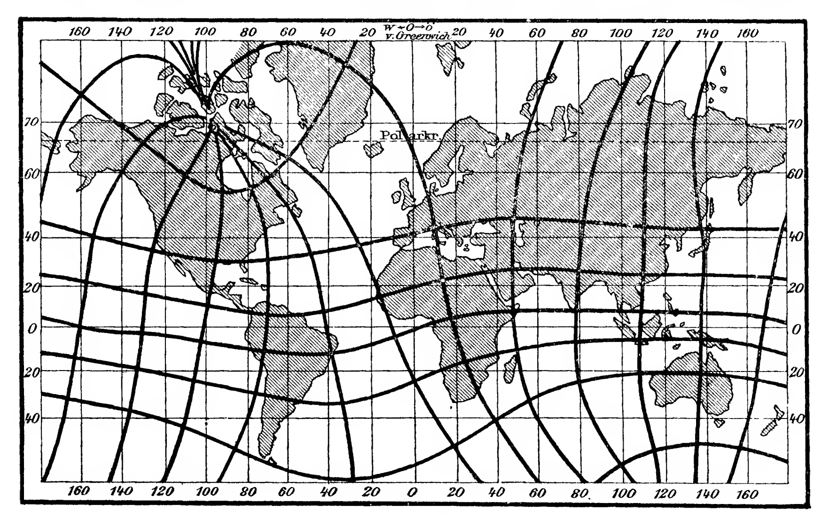



Fig. 139.
Magnetische Meridiankurven für 1885.

nicht aber eine fortschreitende Bewegung des Magnetstabes bewirken kann. Ist $m$ die Polstärke und $H$ die Stärke des Feldes, so ist $Hm$ die an jedem Pole wirkende Kraft; bezeichnet ferner $l$ den Abstand der Pole (nahezu die Länge des Magnetstabes) und $\alpha$ den Winkel der magnetischen Achse mit der Kraftrichtung, so ist $l \sin \alpha$ der Hebelarm des Kräftepaares, und demnach $H m l \sin \alpha$, oder, wenn der Magnetstab zu den Kraftlinien senkrecht steht ($\alpha = 90^0$), $H m l$ sein Drehungsmoment. Das Produkt $m l = M$, d. i. das Drehungsmoment, das ein zu den Kraftlinien senkrecht stehender Magnet in einem homogenen Felde von der Stärke 1 erfährt, heiſst sein magnetisches Moment.

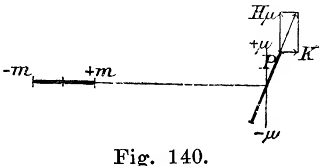



Fig. 140.
Wirkung zweier Magnete.

147. **Wirkung zweier Magnete aufeinander.** Wir beschränken uns auf die Betrachtung des folgenden einfachen Falles. Auf eine in horizontaler Ebene drehbare Magnetnadel ($+\mu$, $-\mu$), welche für sich im magnetischen Meridian einsteht, wirke ein in derselben Horizontalebene liegender Magnetstab, dessen Achse senkrecht zum magnetischen Meridian durch die Mitte der Nadel geht (Fig. 140). Die Länge $l$ des Magnetstabes und diejenige der Nadel seien sehr klein im Vergleich zu der Entfernung $r$ ihrer Mittelpunkte. Sind $m$ und $\mu$

die Polstärken von Stab und Nadel, so ergibt sich die Kraft $K$, mit welcher die beiden Pole $+m$ und $-m$ auf den Pol $+\mu$ wirken:

$$K = \frac{m\,\mu}{(r - {}^1/_2\, l)^2} - \frac{m\,\mu}{(r + {}^1/_2\, l)^2} = \frac{2\, m\, \mu\, l\, r}{(r^2 - {}^1/_4\, l^2)^2},$$

oder, wenn $l$ so klein ist, dafs ${}^1/_4\, l^2$ gegen $r^2$ nicht in Betracht kommt:

$$K = \frac{2\,\mu\, m\, l\, r}{r^4} = \frac{2\,\mu\, m\, l}{r^3},$$

oder, da $m\, l = M$ das magnetische Moment des Stabes ist:

$$K = \frac{2\,\mu\, M}{r^3},$$

d. h. die Wirkung eines Magnetstabes (zweier entgegengesetzt gleicher miteinander fest verbundener Pole) auf einen entfernten Pol ist annähernd der dritten Potenz der Entfernung umgekehrt proportional.

148. **Bestimmung der Horizontalintensität und des magnetischen Moments** (Gaufs). Auf den Pol $+\mu$ der Magnetnadel wirkt noch parallel zum magnetischen Meridian die horizontale Richtkraft $H\mu$, wenn $H$ die Horizontalintensität des Erdmagnetismus bedeutet. Durch die Kraft $K$ wird die Nadel aus dem Meridian abgelenkt um einen Winkel $\varphi$, bis ihre Richtung mit derjenigen der Resultate aus $K$ und $H\mu$ zusammenfällt. Dies tritt ein, wenn

$$\frac{K}{H\mu} = \operatorname{tang}\varphi \quad \text{oder} \quad \frac{2\,\mu\, M}{r^3} = H\,\mu \operatorname{tang}\varphi$$

wird, woraus hervorgeht:

$$\frac{M}{H} = {}^1/_2\, r^3 \operatorname{tang}\varphi.$$

Man findet also das Verhältnis $M/H$ durch Beobachtung der Ablenkung $\varphi$ bei gemessener Entfernung $r$.

Hängt man jetzt den Magnetstab ($+m$, $-m$) in seiner Mitte auf, so schwingt er unter dem Einflufs der horizontalen Komponente des Erdmagnetismus wie ein Pendel, dessen Schwingungsdauer $t$ der Gleichung (S. 61 u. 83)

$$t = \pi \sqrt{\frac{k}{M\,H}}$$

genügen mufs, wenn $k$ das Trägheitsmoment des Stabes bedeutet, während $M\,H$ das an ihm angreifende Drehungsmoment darstellt. Bestimmt man also das Trägheitsmoment $k$ und die Schwingungsdauer $t$, so hat man

$$M\,H = \frac{\pi^2\, k}{t^2}.$$

Durch jenen Ablenkungs- und diesen Schwingungsversuch hat man also das Verhältnis $M/H = A$ und das Produkt $M\,H = B$ gefunden. Wird $r$ in Centimetern, $t$ in Sekunden und $k$ in Grammen und Quadratcentimetern ausgedrückt, so erhält man für $A$ und $B$ und demgemäfs auch für die Horizontalintensität

$$H = \sqrt{\frac{B}{A}}$$

und für das magnetische Moment des benutzten Magnetstabes

$$M = \sqrt{A\,B}$$

ganz bestimmte Zahlenwerte. Man sagt von diesen, dafs sie die Horizontalintensität und das magnetische Moment in absolutem Mafse und zwar im cm-gr-sec-System ausdrücken. Die oben mitgeteilten Werte der Horizontalintensität sind auf diesem Wege bestimmt worden.

149. **Einfluſs (Influenz, Induktion) eines Magnetfeldes.** Eine Eisenstange, welche man in die Inklinationsrichtung hält, wird durch den Einfluſs des Erdmagnetismus magnetisch, und zwar bekommt sie oben einen Südpol, unten einen Nordpol. Kehrt man die Stange um, so kehren sich auch ihre Pole um. Gibt man dem Stab eine andere Richtung, so wirkt nur die in diese Richtung fallende Komponente der Totalintensität magnetisirend, die um so geringer ist, je gröſser der Winkel ist, den er mit der Inklinationsrichtung bildet und ganz verschwindet, wenn er auf ihr senkrecht steht. Auf lotrecht gestellte Stäbe, deren Richtung in unseren Gegenden von derjenigen der Inklinationsnadel nur wenig abweicht, ist der magnetisirende Einfluſs der Erde noch ziemlich bedeutend. Stahlstäbe, in der Richtung der Inklinationsnadel oder auch nur lotrecht gehalten, werden dauernd magnetisch, namentlich wenn man sie in dieser Stellung hämmert. Erschütterungen scheinen nämlich die Drehung der Molekularmagnetchen zu befördern. Daraus erklärt es sich, daſs fast alle Werkzeuge in der Werkstatt eines Schlossers magnetisch sind.

Die Polstärke (Magnetismusmenge), welche auf jeder Endfläche eines Stabes pro Flächeneinheit hervorgerufen wird, ist offenbar der Stärke $T$ des Magnetfeldes proportional, also gleich $\varkappa T$, wenn $\varkappa$ einen für die Substanz des Stabes charakteristischen Zahlenwert, die Magnetisirungszahl, bedeutet. Ist $q$ der Querschnitt, $l$ die Länge, $v = l q$ das Volumen des Stabes, so erlangt er unter dem Einfluſs des Magnetfeldes $T$ die Polstärke $m = \varkappa q T$ und das Moment $M = \varkappa l q T = \varkappa v T$. Die Zahl $\varkappa$, welche das Verhältnis des an einer Stelle des Magnetfeldes in der Volumeneinheit inducirten magnetischen Moments zu der dort herrschenden Feldstärke ausdrückt, ist das Maſs für die magnetische Empfänglichkeit (Susceptibilität) der magnetisirbaren Substanz. Für weiches Eisen ist $\varkappa = 32$, für Eisenglanz 0,15.

# VII. Elektricität.

150. **Elektrisirung.** Wenn man einen Glasstab oder eine Siegellackstange reibt, etwa mit einem wollenen Lappen, so erlangen sie die Eigenschaft, leichte Körperchen, wie Papierschnitzel, Asche, Stückchen von Holundermark u. dergl. anzuziehen. Da dieses Verhalten in alter Zeit (Thales, 600 v. Chr.) zuerst am Bernstein, welchen die Griechen Elektron nannten, beobachtet worden war, so nannte man den Zustand, in welchem sich der geriebene Körper befindet, elektrisch, und die Ursache des Zustandes Elektricität (Gilbert, 1600).

151. **Leiter und Nichtleiter.** Aufser den genannten zeigen auch andere Körper, z. B. Schwefel, Edelsteine, Glimmer, Seide, Harze (Schellack, Siegellack, Bernstein), Kautschuk (Kamm-Masse, Ebonit), Guttapercha, Paraffin, Kollodium, Pyroxylinpapier u. a. diese Eigenschaft; dagegen bemüht man sich vergebens, einen in der Hand gehaltenen Metallstab durch Reiben elektrisch zu machen. Versieht man aber den Metallstab mit einem Griff von Glas oder Hartkautschuk, den man mit der Hand fafst, so wird er durch Reiben gleichfalls elektrisch, verliert aber diese Eigenschaft sofort wieder, wenn man ihn mit dem Finger berührt. Wir schliefsen daraus, dafs, als die Metallstange unmittelbar in der Hand gehalten wurde, jenes Wirksame, das wir Elektricität nennen, beim Reiben zwar ebenfalls erzeugt worden war, jedoch durch das Metall und die berührende Hand sofort entwich, dagegen durch den Griff von Glas oder Ebonit nicht entweichen konnte. Während also Metall die Elektricität fortpflanzt oder leitet, besitzen Glas und Kautschuk diese Fähigkeit nicht; jenes ist ein Leiter (Konduktor) der Elektricität, diese sind Nichtleiter (Gray, 1729). Die einem Punkte eines Leiters mitgeteilte Elektricität verbreitet sich sofort über den ganzen Körper, und entweicht in die ebenfalls leitende Erde, wenn der Körper mit dieser in leitender Verbindung steht. Bei einem Nichtleiter dagegen bleibt die Elektricität auf die Stelle beschränkt, wo sie hervorgerufen wurde, und wird ihm bei Berührung mit einem Leiter nur im Berührungspunkte selbst entzogen.

Die besten Leiter sind die Metalle, weniger gut leiten der menschliche Körper, Kohle, Graphit, Wasser, Säuren, Salzlösungen, Holz, Papier, Stroh, Baumwoll- und Leinenfaser, Holundermark, Leder, viele Gesteine und die Erde; Nichtleiter dagegen, oder richtiger sehr schlechte Leiter, sind die oben bereits aufgezählten Körper,

welche eben wegen dieser Eigenschaft die auf ihnen durch Reiben hervorgerufene Elektricität bewahren; aufserdem noch einige Flüssigkeiten, wie Öle, Petroleum, Alkohol, Schwefelkohlenstoff, ferner die Luft und sämtliche Gase.

152. **Isolirung.** Soll ein Leiter den elektrischen Zustand, in welchen man ihn auf irgend eine Weise versetzt hat, beibehalten, so mufs er rings mit Nichtleitern umgeben und dadurch von allen übrigen Leitern und insbesondere von der Erde getrennt oder „isolirt“ werden; wegen dieser Anwendung nennt man die Nichtleiter auch Isolatoren. Ein Metallkörper, der an gläsernem Griff in der Hand gehalten wird, oder auf gläsernem Fufse steht, ist isolirt; denn die Luft, mit der er aufserdem noch in Berührung steht, ist, wenn trocken, ein Nichtleiter; der in feuchter Luft enthaltene Wasserdampf leitet zwar ebenfalls nicht, beschlägt aber die Oberfläche der festen Isolatoren mit einer dünnen Wasserschicht und macht sie dadurch leitend.

153. **Zwei Arten von elektrischen Zuständen.** Zur bequemeren Beobachtung der anziehenden Wirkung eines elektrischen Körpers hängt man eine kleine Kugel aus Kork oder Holundermark mittels eines Seidenfadens an einem gläsernen Träger auf; man nennt diese einfache Vorrichtung „elektrisches Pendel“.

Nähert man dem Kügelchen einen geriebenen Glasstab, so wird es von ihm angezogen, kommt mit ihm kurze Zeit in Berührung, und wird sodann von dem Glasstab dauernd abgestofsen; von einer geriebenen Siegellackstange aber wird es jetzt lebhafter angezogen als in seinem ursprünglichen Zustand. Hat man das Kügelchen durch Berühren mit der Hand in seinen ursprünglichen Zustand zurückversetzt, und nähert ihm die geriebene Siegellackstange, so wird es von dieser zuerst angezogen, dann dauernd abgestofsen, und nun von dem Glasstab lebhafter angezogen.

Die Glas- und die Siegellackstange befinden sich demnach in verschiedenen elektrischen Zuständen, da sie auf das mit einer derselben berührte Kügelchen entgegengesetzte Wirkungen ausüben. Prüft man andere geriebene Nichtleiter an dem elektrischen Pendel, so findet man, dafs sie sich entweder wie Glas oder wie Siegellack (Harz) verhalten.

Es gibt also zwei und nur zwei verschiedene elektrische Zustände, die wir als den glaselektrischen und den harzelektrischen Zustand bezeichnen (Dufay, 1733).

Um sich von der Entstehung dieser Zustände eine Vorstellung zu machen, hat man die Annahme gemacht (Symmer, 1759), dafs es zwei schwerelose Flüssigkeiten (Imponderabilien), zwei elektrische Fluida gebe, welche man als Glaselektricität und Harzelektricität unterscheiden kann. Die elektrischen Zustände der Körper sollen durch eine Anhäufung dieser Fluida auf den Körpern hervorgebracht werden. Eine geriebene Glasstange soll Glaselektricität, eine geriebene Siegellackstange soll Harzelektricität enthalten. Dieser dualistischen Theorie stand eine unitarische gegenüber (Franklin, 1748); nach dieser gibt es nur ein elektrisches Fluidum, das in allen Körpern im unelektrischen

Zustande in einer gewissen Menge vorhanden sein soll; ein gröſserer oder geringerer Betrag als dieser Normalbetrag soll den einen oder den anderen der beiden elektrischen Zustände bedingen. Die dualistische Theorie hat sich als die bequemere erwiesen. Ihr entstammen die meisten Ausdrücke, die man für elektrische Gröſsen oder elektrische Vorgänge eingeführt hat. Man bedient sich ihrer heute noch, wenn auch die Vorstellungen über die Natur des Stoffs, dem wir die elektrischen Wirkungen zuschreiben, wesentlich andere sind, als in jenen älteren Theorien.

Das Ergebnis obiger Versuche können wir also so aussprechen: Gleichnamig elektrisirte Körper stoſsen sich ab, ungleichnamig elektrisirte Körper ziehen sich an. Insofern aber als man diese Kräfte auf die Wirkungen der auf den Körpern vorhandenen Elektricitäten zurückführt, sagt man auch geradezu: Gleichnamige Elektricitäten stoſsen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an. Die Anziehung oder Abstoſsung zweier elektrisirter Körperchen, welche im Verhältnis zu ihrer Entfernung klein sind, erfolgt stets in der Richtung ihrer geraden Verbindungslinie.

154. **Übertragung der Elektricität.** Man erkennt jetzt auch, daſs vorhin das isolirte Kügelchen des elektrischen Pendels, nachdem es mit der Glasstange in Berührung war, glaselektrisch, und durch Berührung mit der Siegellackstange harzelektrisch geworden war. Man beobachtet ferner, daſs leichte Körperchen, welche von einem elektrisirten Körper angezogen worden sind und zunächst an ihm haften, nach einiger Zeit wieder abgestoſsen werden, indem sie gleichnamig elektrisch geworden sind. Die Elektrisirung eines Körpers läſst sich also ohne Änderung ihrer Beschaffenheit durch Berührung auf einen isolirten Leiter übertragen, oder — wie man zu sagen pflegt — der Leiter kann mit Elektricität geladen werden. Man kann demnach jeden Körper, sei es durch Reibung, sei es durch Übertragung, sowohl glas- als harzelektrisch machen.

155. **Elektricitätsmenge.** Wird eine leitende elektrisirte Kugel mit einer ihr genau gleichen unelektrischen Kugel in Berührung gebracht, so zeigen sich nach der Trennung beide Kugeln gleichnamig und gleichstark elektrisch, jedoch schwächer, als die erste Kugel vor der Berührung war, was am elektrischen Pendel nachgewiesen werden kann. Die ursprüngliche Ladung der ersten Kugel hat sich also auf beide Kugeln zu gleichen Hälften verteilt. Elektrische Ladung kann demnach geteilt und daher auch vervielfacht werden. Man ist daher berechtigt, von Elektricitätsmengen oder elektrischen Massen zu sprechen, deren Gröſse nach einer als Einheit gewählten Elektricitätsmenge gemessen werden kann. Man nimmt dabei an, daſs die Elektricitätsmenge eines Körpers der anziehenden oder abstoſsenden Kraft proportional sei, die er unter übrigens gleichen Umständen auf einen anderen elektrisirten Körper, z. B. die Kugel des elektrischen Pendels, ausübt.

156. **Positive und negative Elektricität.** Von zwei durch gläserne Griffe isolirten gleichen Metallkugeln werde nun die eine mit Glas-, die andere ebenso stark mit Harzelektricität geladen; ob

sie gleichstark elektrisch sind, erkennt man daran, daſs sie die unelektrische Kugel des Pendels aus gleicher Entfernung gleichweit aus der lotrechten Gleichgewichtslage ablenken. Bringt man jetzt die Kugeln miteinander in Berührung, so erweisen sie sich nachher als vollkommen unelektrisch. Die beiden ungleichnamigen Elektricitäten, in gleicher Menge miteinander vereinigt, heben sich also gegenseitig auf, oder sie neutralisiren sich. Zwei Gröſsen, welche sich so verhalten, bezeichnet man als entgegengesetzte, und zwar die eine als positiv, die andere als negativ. Gräbt man z. B. ein Loch, so bildet die ausgeschaufelte Erde einen Haufen; der Haufen ist eine positive, das Loch die entsprechende negative Gröſse; vereinigt man beide miteinander, d. h. schaufelt man den Haufen in das Loch, so heben sie sich sozusagen gegenseitig auf, und es entsteht wieder die ursprüngliche ebene Bodenfläche. Man kann daher das Verhalten der beiden entgegengesetzten Elektricitäten zu einander treffend dadurch bezeichnen, daſs man die eine positiv (+), die andere negativ (—) nennt. Welche von beiden als positiv zu betrachten sei, darüber geben uns die Erscheinungen selbst keinen Wink; man ist aber allgemein dahin übereingekommen, die Glaselektricität positiv, die Harzelektricität negativ zu nennen (Lichtenberg, 1777).

157. **Gleichzeitige Erzeugung beider Elektricitäten.** Wie man kein Loch graben kann, ohne einen gleichgroſsen Erdhaufen aufzuwerfen, so ist es auch unmöglich, die eine Elektricität zu erzeugen, ohne gleichzeitig ebensoviel von der anderen hervorzurufen. Reibt man einen Glasstab mit einem Kautschuklappen und nähert diesen letzteren der zuvor negativ geladenen Kugel des elektrischen Pendels, so wird dieselbe abgestoſsen, von dem Glasstab aber angezogen, und zeigt somit, daſs der letztere positiv, der als Reibzeug dienende Kautschuklappen negativ elektrisch geworden ist. Läſst man den Glasstab mit seinem Reibzeug in Berührung, so wirken sie vereint gar nicht auf das Pendel, woraus hervorgeht, daſs die beiden entgegengesetzten Elektricitäten in gleicher Menge erzeugt worden sind.

Diese Versuche führten für die Theorie der elektrischen Fluida zu der Vorstellung, daſs die beiden Fluida bei dem Vorgange der Elektrisirung nicht erst entstehen, sondern nur getrennt werden, und daſs sie in jedem unelektrischen Körper in gleichen Mengen miteinander vereinigt sind. Man sagt daher auch, die unelektrischen Körper befinden sich im neutralen Zustand.

Wenn man je zwei ungleichartige Körper aneinander reibt, und am elektrischen Pendel prüft, welche Elektrisirung jeder derselben angenommen hat, kann man alle Körper in eine Reihe ordnen, in welcher jeder, mit einem der folgenden gerieben, positiv, mit einem der vorhergehenden negativ wird (Canton, 1754). Die wichtigsten Körper dieser Reibungsreihe sind: Haare (Katzenfell, Fuchsschwanz), polirtes Glas, Wolle, Papier, Seide, mattes Glas, Kautschuk, Harze (Siegellack), Bernstein, Schwefel, Metalle, Kollodium (Schieſsbaumwolle). Je weiter zwei Stoffe in dieser Reihe voneinander

entfernt stehen, desto besser ist ihre Wirkung; man wird daher Harz mit Pelz, Glas mit Metall (amalgamirtem Leder) reiben.

158. **Sitz der elektrischen Ladung.** Hat man eine auf einem Glasfuſs stehende Metallkugel elektrisch gemacht, und bedeckt sie mit zwei an gläsernen Griffen gehaltenen hohlen metallenen Halbkugeln, so erweist sich nach Wegnahme der letzteren die Kugel ganz unelektrisch; ihre Elektricität ist auf die Halbkugeln, welche einen Augenblick ihre Oberfläche bildeten, übergegangen (Coulomb).

Auf eine isolirte Metallplatte stelle man ferner ein Metallsäulchen, an welchem an einem dünnen Draht eine Holundermarkkugel herabhängt; führt man der Metallplatte Elektricität zu, so wird das Pendel von dem Metallsäulchen lebhaft abgestoſsen; deckt man aber jetzt eine Glocke aus Drahtgewebe, die man an einem Glasgriffe hält, darüber, so hängt das Pendel an dem Säulchen schlaff herab; es ist jetzt in das Innere des ganzen Leiters versetzt, und sein Verhalten lehrt uns, daſs in diesem Innern keine elektrischen Wirkungen stattfinden; solche finden sich ausschlieſslich an der äuſseren Oberfläche des Leiters, was man daran erkennt, daſs Streifen aus Blattgold, welche man auſsen an das Drahtgitter geklebt hat, nicht mehr schlaff herabhängen, sondern lebhaft abgestoſsen werden. Führt man dem ganzen aus Platte, Pendel und darüber gedeckter Drahtglocke bestehenden isolirten Leiter, nachdem er sich wieder im unelektrischen Zustand befindet, Elektricität zu, so werden die Goldblättchen an der Oberfläche abgestoſsen, das elektrische Pendel im Innern aber bleibt in Ruhe.

Wir machen noch einen dritten Versuch, indem wir eine auf einem Glasfuſs stehende metallene Hohlkugel elektrisiren. Bringen wir ein kleines leitendes Kügelchen an isolirendem Handgriffe mit der Auſsenseite der Kugel auf einen Augenblick in Berührung, so erweist sich das Kügelchen nach der Berührung elektrisch. Führt man es dagegen durch eine kleine Öffnung in das Innere der Hohlkugel und berührt die Innenseite, so zeigt es, herausgezogen, keine Spur von der elektrischen Ladung der Kugel.

Im Innern eines Leiters, auf welchem Elektricität ausgebreitet und ins Gleichgewicht gekommen ist, herrscht demnach immer der neutrale Zustand. Es wirken daselbst keine elektrischen Kräfte oder vielmehr sie halten sich im Gleichgewicht. Die Kräfte, welche die elektrische Ladung des Leiters ausübt, und durch welche wir überhaupt den Schluſs darauf machen, daſs der Leiter geladen ist, treten nur in der äuſseren Umgebung des Leiters auf. Sie gehen von seiner Oberfläche aus und man sagt daher, daſs die elektrische Ladung auf einem Leiter sich im Gleichgewichtszustande ausschlieſslich auf seiner Oberfläche befinde.

Metallteile an Apparaten für Versuche über elektrisches Gleichgewicht brauchen daher nicht massiv zu sein, sondern können ebensogut hohl sein.

159. **Dichte der Elektricität.** Da die elektrische Ladung

eine Gröfse ist, die wir in einer bestimmten Einheit messen können (155), und da sie andererseits nach dem vorigen auf der Oberfläche der Leiter ausgebreitet ist, so können wir die Frage aufwerfen, wie grofs die Elektricitätsmenge auf einem Teil der Oberfläche, z. B. auf der Flächeneinheit ist. Diese Gröfse oder das Verhältnis der Ladung eines Flächenelements zu der Gröfse desselben nennt man die Dichte der Elektricität an der betreffenden Stelle der Oberfläche.

Da wir die Ladung der Kraft, die sie ausübt, proportional gesetzt haben (155), so ist auch die Dichte auf einem Flächenelemente proportional der Kraft, die von diesem Elemente ausgeht. Laden wir eine isolirte Kugel, so geht von allen Teilen ihrer Oberfläche die gleiche Kraftwirkung aus; die Elektricität ist gleichmäfsig auf der Kugel ausgebreitet, sie hat überall dieselbe Dichte. Ladet man dagegen einen isolirten, langgestreckten Cylinder, so ist die abstofsende oder anziehende Wirkung, die er auf ein gleich- oder ungleichnamig elektrisirtes Pendel ausübt, an seinen Enden viel gröfser als in der Mitte. Die Elektricität ist hier also mit ungleichmäfsiger Dichte auf dem Körper verteilt.

Man kann die Dichten an verschiedenen Stellen der Oberfläche eines Körpers dadurch vergleichen, dafs man die betreffenden Stellen mit einem an isolirendem Griff befestigten Metall-Scheibchen (Probescheibchen) oder Kügelchen (Probekugel) berührt. Diese nehmen einen verhältnismäfsigen Teil der auf der berührten Fläche befindlichen Elektricität mit sich fort, ohne die Gesamtladung merklich zu verringern. Das Verhältnis der Ladungen dieser Probekörperchen ist daher gleich dem Verhältnis der Dichten an den berührten Stellen.

Auf einem Ellipsoide häuft sich die Elektricität am dichtesten an an den Endpunkten der gröfsten Achse. Ist die Achse im Verhältnis zu den anderen sehr lang, so wächst die Dichte nach ihrem Ende zu sehr rasch, und erreicht dort einen um so höheren Betrag, je spitzer dieses Ende ist. Denkt man sich die Umdrehungsachse eines Rotationsellipsoids immer kleiner, so geht dasselbe in eine kreisrunde Scheibe über, auf welcher die Dichte nach aufsen hin anfangs langsamer, dann sehr rasch zunimmt, und am Rande selbst am gröfsten ist. Überhaupt sammelt sich die Electricität am dichtesten an denjenigen Stellen, an welchen der Krümmungsradius der Oberfläche am kleinsten ist, also besonders an Kanten, Ecken und Spitzen.

160. **Elektrostatischer Druck.** Die Kraft, die von der Oberfläche eines geladenen Leiters ausgeht, steht, wenn Gleichgewicht eingetreten ist, in jedem Punkte seiner Oberfläche auf dem zugehörigen Flächenelemente senkrecht; denn stände sie schief, so würde kein Gleichgewicht bestehen, sondern die in die Tangentialebene der Oberfläche fallende Komponente der Kraft würde eine Fortbewegung der elektrischen Ladung des Flächenelements und damit eine Veränderung der elektrischen Verteilung auf der Oberfläche hervorrufen. Wie

nun durch diese senkrecht nach aufsen hin wirkende elektrische Kraft ein kleiner, gleichnamig geladener Körper von der Oberfläche in senkrechter Richtung fortgetrieben werden würde, so werden auch die Teilchen der Oberfläche selbst von dieser Kraft nach aufsen gezogen. Die ganze Oberfläche des Körpers unterliegt einem nach aufsen gerichteten Zuge, den man den elektrostatischen Druck nennt.

Ist der Leiter von Luft umgeben, so wirkt dieser Druck dem Luftdruck entgegen und vermindert ihn. Es läfst sich in der That zeigen (van Marum), dafs ein mit Wasserstoff gefüllter Ballon scheinbar leichter und seine Steigkraft gröfser wird, wenn man ihn elektrisirt.

Die Wirkung, die eine elektrische Kraft auf eine Elektricitätsmenge ausübt, ist einerseits der Gröfse der Kraft, gemessen für die Einheit der Elektricitätsmenge, andererseits dem Betrage der Elektricitätsmenge proportional. Im Falle des elektrostatischen Drucks ist die Kraft, welche auf die Einheit der Elektricitätsmenge an jeder Stelle der Oberfläche wirksam sein würde, der elektrischen Dichte an dieser Stelle proportional. Die Menge aber, auf welche diese Kraft in jedem Flächenelemente wirkt, ist ebenfalls der Dichte daselbst proportional. Daher ist der elektrostatische Druck dem Quadrat der Dichte proportional.

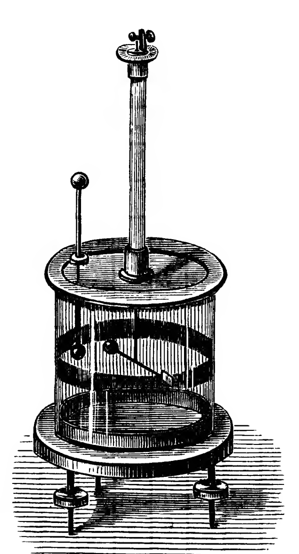
161. **Wirkung der Spitzen.** Bei hinreichend grofser Dichte wird der elektrostatische Druck so grofs, dafs die Isolation der nächsten Schichten des Isolators aufhört und die Elektricität von der Oberfläche des Leiters teilweise in den Isolator übergeht. Ist der elektrische Körper von Luft umgeben, so werden die ihn zunächst umgebenden Luftschichten (und die in der Luft schwebenden Stäubchen) gleichnamig elektrisch und werden um so stärker abgestofsen, je gröfser die Dichte der Elektricität ist; an Spitzen namentlich entweicht die elektrisch gewordene Luft so kräftig (Franklin, 1747), dafs sie sich der entgegengehaltenen Hand als elektrischer Wind fühlbar macht und eine Kerzenflamme zur Seite bläst. Man sagt daher, dafs die Elektricität aus Spitzen ausströme.

Ein leichtes, mit einem Hütchen in seiner Mitte auf eine isolirte Nadelspitze aufgesetztes Metallrädchen, das elektrische Flugrad, dessen zugespitzte Speichen alle nach derselben Richtung gekrümmt sind, wird durch den Rückstofs (vgl. 69) der von diesen Spitzen abgestofsenen Luft, der Ausströmungsrichtung entgegen, in rasche Umdrehung versetzt.

Ein mit einer Spitze versehener Leiter kann nicht oder nur schwach elektrisch geladen werden, weil der von der Spitze ausgehende elektrische Wind die Ladung rasch entführt. Soll ein Leiter die ihm zugeführte Elektricität bewahren, so mufs man ihm unter Vermeidung aller scharfen Kanten und Ecken eine möglichst abgerundete Gestalt geben; soll er dagegen seine Elektricität rasch abgeben, so versieht man ihn mit Spitzen.

Ähnlich wie Spitzen wirken auch Flammen und die von glimmenden Körpern aufsteigenden feinen Rauchsäulen.

162. **Coulombs Gesetz.** Coulomb (1788) hat die Kraft, mit welcher sich zwei kleine elektrische Körper gegenseitig abstofsen oder anziehen, mittels der von ihm konstruirten Drehwage (Torsionswage, 52) gemessen. An einem feinen Silberdraht (Glas- oder Quarzfaden) hängt ein wagrechtes Schellackstäbchen (Fig. 141), das an einem Ende eine kleine vergoldete Kugel aus Holundermark trägt. Das Stäbchen schwebt inmitten eines cylindrischen Glasgehäuses, auf dessen Deckel sich ein vertikales Glasrohr erhebt, in welchem der Draht herabhängt; die Stellung des Stäbchens kann an einer am Umfang des Gehäuses angebrachten Gradeinteilung abgelesen werden. Das Glasrohr trägt oben eine Messingfassung, den Torsionskreis, deren Umfang in Grade eingeteilt ist; auf sie pafst eine am Rande mit einer Marke versehene drehbare Messingplatte, an welcher der Draht befestigt ist. Durch ein Loch des gläsernen Deckels kann mittels Schellackgriffes eine zweite gleiche Kugel (die Standkugel) dicht neben die erste Kugel gebracht werden. Hat man die Standkugel elektrisch gemacht, so wird auch die bewegliche Kugel bei Berührung mit ihr gleichnamig elektrisch, und wird nun von derselben abgestofsen; das Stäbchen dreht sich und drillt den an seinem oberen Ende befestigten Draht, bis die Kraft, mit welcher der Draht vermöge seiner Torsionselasticität (vgl. 52) der Drillung widerstrebt, der abstofsenden Kraft das Gleichgewicht hält. Um die bewegliche Kugel der Standkugel näher zu bringen, mufs man durch Drehung der oberen Metallplatte den Draht noch stärker drillen, um einen Winkel, welcher am Torsionskreis abgelesen wird. Bei jeder Entfernung der Kugeln wird die abstofsende elektrische Kraft durch die elastische Kraft der Drillung, die ihr das Gleichgewicht hält, gemessen; letztere aber ist, wie man weifs, proportional dem Winkel, um welchen der Draht gedrillt ist, also proportional der Summe aus dem Winkel, welchen das Stäbchen mit seiner Gleichgewichtslage bildet, und dem Winkel, um welchen der Torsionskreis gedreht wurde. War die anfängliche Entfernung von der Gleichgewichtslage 1, und hat man dieselbe sodann auf $^1/_2$ und $^1/_4$ gebracht, so ergibt sich, dafs die zugehörigen Drillungen und demnach auch die abstofsenden Kräfte sich verhalten wie 1 : 4 : 16, d. i. umgekehrt wie die Quadrate der Entfernungen. Dasselbe Gesetz findet man für die Anziehung, welche die Kugeln bei ungleichnamigen Ladungen aufeinander ausüben.


Fig. 141.
Drehwage.

Bestimmt man auf dieselbe Weise die Kräfte, mit welchen die Standkugel bei gleichbleibender Entfernung die bewegliche Kugel abstöfst, nachdem man die Ladung der ersteren durch Berührung mit einer gleichgrofsen unelektrischen Kugel auf $^1/_2$, dann auf $^1/_4$ der ursprünglichen Ladung vermindert hat, so zeigt sich, dafs die abstofsenden Kräfte sich verhalten wie $1 : {}^1/_2 : {}^1/_4$; also wie die wirksamen Elektricitätsmengen, was übrigens nach der obigen (155) Begriffsbestimmung der Elektricitätsmenge selbstverständlich ist.

Es ergibt sich sonach das Coulombsche Gesetz: Die Kraft, mit welcher zwei elektrische Teilchen aufeinander wirken, ist direkt proportional ihren Elektricitätsmengen und umgekehrt proportional dem Quadrate ihrer Entfernung.

Coulomb hat dieses Gesetz noch durch ein anderes Verfahren bestätigt. Gegenüber einer gröfseren isolirten und mit Elektricität geladenen Metallkugel hängt in gleicher Höhe mit ihrem Mittelpunkt an einem Coconfaden ein horizontales Schellackstäbchen, an dessen einem Ende ein leitendes Kügelchen sich befindet, das mit der entgegengesetzten Elektricität geladen wird. Das Stäbchen stellt sich in die Richtung nach dem Mittelpunkt der Kugel ein, in welchem man, falls das Gesetz des umgekehrten Quadrates der Entfernung giltig ist, die gesamte Elektricitätsmenge der Kugel vereinigt denken kann. Bringt man es ein wenig aus dieser seiner Gleichgewichtslage, so schwingt es um dieselbe nach denselben Gesetzen wie ein gewöhnliches Pendel, und zwar um so langsamer, je weiter man es von der Kugel entfernt. Coulomb zählte nun mittels eines Chronometers die in gleicher Zeit erfolgenden Schwingungen und mafs die jedesmalige Entfernung des Stäbchens von dem Mittelpunkt der Kugel. Nach dem Gesetze der Pendelbewegung verhalten sich aber die Kräfte wie die Quadrate der Schwingungszahlen (40); es konnte somit das Verhältnis der in verschiedenen Entfernungen wirksamen Kräfte bestimmt werden; es ergab sich gleich dem umgekehrten Verhältnis der Quadrate der Entfernungen.

Sowohl bei der Drehwage als bei den Schwingungsbeobachtungen wirkt störend der Umstand, dafs während der Versuche Verluste an Elektricität stattfinden. Coulomb vermochte jedoch, gleichfalls mittels der Drehwage, diese Verluste zu bestimmen und in Rechnung zu bringen, und dadurch sein wichtiges Grundgesetz der elektrischen Kraftwirkung gegen jeden Einwurf sicher zu stellen.

Es läfst sich übrigens das Coulombsche Gesetz aus der viel leichter und genauer zu beweisenden Thatsache, dafs sich die Elektricität nur an der Oberfläche der Leiter befindet, und im Innern die elektrischen Kräfte in jedem Punkte sich aufheben, durch eine einfache Überlegung folgern.

Auf einer Kugelfläche breitet sich die Elektricität mit überall gleicher Dichte aus. Wir denken uns nun durch einen Punkt $P$ irgendwo im Innern der Kugel einen schmalen Doppelkegel gelegt mit der Spitze im Punkt $P$. Derselbe schneidet auf der Kegelfläche zwei Flächenstückchen $\sigma$ und $\sigma'$ aus, welche sich zu einander verhalten wie die Quadrate ihrer Entfernungen $r$ und $r'$

vom Punkt $P$; ebenso verhalten sich die Elektricitätsmengen, mit welchen sie beladen sind. Diese Elektricitätsmengen wirken im Verhältnis ihrer Gröfse auf ein im Punkt $P$ gedachtes elektrisches Teilchen nach entgegengesetzten Richtungen. Da aber im Punkt $P$ Gleichgewicht herrscht, so müssen die beiden entgegengesetzten Kräfte einander gleich sein. Dies ist aber nur möglich, wenn die gröfsere Elektricitätsmenge (auf $\sigma'$) infolge ihrer weiteren Entfernung ($r'$) in demselben Verhältnis schwächer wirkt, als sie gröfser ist. Die Wirkung elektrischer Massen aufeinander mufs also im umgekehrten Verhältnis des Quadrats ihrer Entfernung stehen.

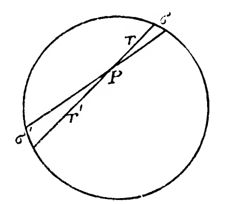


Fig. 142.
Coulombs Gesetz

Bezeichnet man mit $e$ und $e'$ die Elektricitätsmengen zweier kleiner Teilchen, mit $r$ ihre Entfernung, und bedeutet $f$ eine (von der Wahl der Einheit der Elektricitätsmenge abhängige) positive Konstante, so wird die Kraft $F$ ausgedrückt durch $F = f \cdot \frac{e\,e'}{r^2}$. Sind beide Elektricitätsmengen gleichnamig, so ist $F$ positiv und bedeutet eine abstofsende Kraft, welche die Entfernung der Teilchen voneinander zu vergröfsern strebt; sind die Elektricitäten entgegengesetzt, so ist $F$ negativ und bedeutet eine anziehende Kraft, welche ihre Entfernung zu verkleinern strebt.

Wählt man als Einheit der Elektricitätsmenge diejenige, welche auf die ihr gleiche Menge in der Entfernung 1 (1 cm) die Kraft 1 (1 Dyne) ausübt, so wird $f = 1$, und das Coulombsche Gesetz gewinnt folgenden einfachen Ausdruck:

$$F = \frac{e\,e'}{r^2}.$$

163. **Wirkung einer elektrisirten Kugel.** Aus dem Coulombschen Gesetz folgt, dafs eine Kugel, auf deren Oberfläche die Elektricität ringsum gleichmäfsig ausgebreitet ist, auf einen elektrischen Punkt ebenso wirkt, als wenn die ganze Elektricitätsmenge im Mittelpunkt vereinigt wäre (vgl. S. 68).

Der äufsere Punkt $P$ sei von dem Mittelpunkt $O$ (Fig. 143) der Kugel um $OP = r$ entfernt. Wir legen von $P$ aus den Berührungskegel $PQO'$ an die Kugel, dessen Grundfläche $QQ'$ die Gerade $OP$ in $P'$ schneidet. Dann ist $OQ = R$ (Radius der Kugel) die mittlere Proportionale zwischen $OP' = r'$ und $OP = r$, d. h. man hat

$$r' : R = R : r.$$

Ist nun $M$ ein beliebiger Punkt der Kugeloberfläche, der von $P$ um $PM = \varrho$ und von $P'$ um $P'M = \varrho'$ absteht, so müssen, weil $OM = OQ = R$ ist, die Dreiecke $OPM$ und $OMP'$ einander ähnlich, und der Winkel $OMP'$ gleich dem Winkel $OPM = \varphi$ sein.

In $P'$ denke man sich nun die Spitze eines Kegels von sehr kleiner Öffnung, der auf einer um $P'$ beschriebenen Kugel vom Radius 1 ein Flächenstückchen $\omega$, auf einer ebenfalls von $P'$ aus beschriebenen Kugel vom Radius $\varrho'$ ein Stückchen $\varrho'^2\,\omega$, und auf der gegebenen Kugel bei $M$ ein Flächenstückchen $\sigma$ ausschneidet. Da die zu den Flächenstückchen $\varrho'^2\,\omega$ und $\sigma$ senkrecht stehenden Geraden $P'M$ und $OM$ den Winkel $\varphi$ miteinander bilden, so ist $\sigma = \varrho'^2\,\omega/\cos\varphi$. Ist $\delta$ die Dichte der Elektricität auf der Kugel, und befindet sich im Punkt $P$ die Elektricitätsmenge 1, so ist die von dem Flächenteilchen in $M$ auf den Punkt $P$ in der Richtung $MP$ ausgeübte Kraft nach dem Coulombschen Gesetz:

$$\frac{\sigma\,\delta}{\varrho^2} = \frac{\varrho'^2\,\delta\,\omega}{\varrho^2\cos\varphi}.$$

Zerlegen wir diese Kraft in zwei Komponenten senkrecht zu $OP$ und längs $OP$, so wird erstere durch die entgegengesetztwirkende Komponente, welche von dem zu $M$ symmetrisch liegenden Punkt $M'$ herrührt, aufgehoben; die übrig bleibende längs $OP$ wirkende Komponente aber ergibt sich, wenn man den vorstehenden Ausdruck mit $\cos\varphi$ multiplizirt, und beträgt demnach $\varrho'^2\,\delta\,\omega/\varrho^2$. Da aber wegen der Ähnlichkeit der Dreiecke $OMP'$ und $OPM$ $\varrho':\varrho = R:r$ ist, so ist diese Komponente auch:

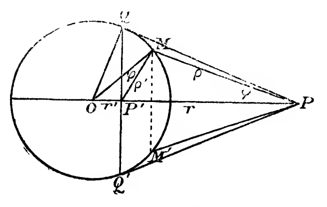


Fig. 143.
Wirkung einer Kugel.

$$\frac{R^2\,\delta\,\omega}{r^2}.$$

Um nun die auf $P$ längs $OP$ wirkende Gesamtkraft zu erhalten, brauchen wir blofs die allen Punkten der Kugeloberfläche entsprechenden Komponenten zu summiren; wir erhalten dann an Stelle von $\omega$ in letzterem Ausdruck die Summe aller Oberflächenstückchen auf der um $P'$ beschriebenen Kugel vom Radius 1, d. i. die Gesamtoberfläche dieser Kugel $= 4\pi$.

Die von der Kugel auf den Punkt $P$ ausgeübte Kraft ist also

$$F = \frac{4\pi\,R^2\,\delta}{r^2},$$

oder weil $4\pi\,R^2$ die Oberfläche der gegebenen Kugel ist, und sonach $4\pi\,R^2\,\delta$ die auf der ganzen Kugelfläche vorhandene Elektricitätsmenge $E$ ausdrückt:

$$F = \frac{E}{r^2},$$

in welcher Gleichung der obige Satz sich ausspricht.

An der Kugeloberfläche selbst ($r = R$) wirkt hiernach auf die Einheit der Elektricitätsmenge die Kraft

$$F = 4\pi\,\delta.$$

Stellt man sich vor, dafs die Elektricität als eine Schicht von äufserst geringer Dicke auf der Oberfläche ausgebreitet sei, so ist $F = 4\pi\,\delta$ die Kraft, welche auf einen mit der Einheit der Elektricitätsmenge geladenen Punkt der äufseren Oberfläche dieser Schicht wirkt; an ihrer inneren Oberfläche, d. h. auf dem Leiter selbst, ist die Kraft Null, wie auch im Innern des Leiters Innerhalb der Schicht nimmt sonach die Kraft stetig zu von dem Wert Null an der Oberfläche des Leiters bis zum Wert $4\pi\,\delta$ an der äufsersten Grenze der Schicht. Auf die Elektricitätsmenge $\delta$, welche in der Schicht über der Flächeneinheit angehäuft ist, wirkt daher pro Einheit nicht die Kraft $4\pi\,\delta$, sondern ein zwischen Null und $4\pi\,\delta$ liegender Mittelwert. Nehmen wir als solchen das arithmetische Mittel $2\pi\,\delta$, so ergibt sich der auf die elektrische Ladung der Flächeneinheit ausgeübte elektrostatische Druck $= 2\pi\,\delta^2$. Diese Werte von Kraft und Druck an der Oberfläche gelten übrigens nicht nur für die Kugel, sondern ganz allgemein für beliebig gestaltete Leiter.

164. **Elektrisches Feld. Elektrische Spannung (Potential). Niveauflächen. Kraftlinien.** Den von dem Einflufs eines elektrischen Körpers beherrschten Bezirk nennt man das elektrische Feld, und die in einem seiner Punkte auf die Elektricitätsmenge 1 wirkende Kraft die Feldstärke; das Feld erstreckt sich eigentlich in unendliche Ferne, wo nach dem Coulombschen Gesetz die Kraft Null ist, kann aber da, wo die Wirkungen wegen zu grofser Entfernung unmerklich geworden sind, rings begrenzt gedacht werden,

Denken wir uns eine positiv elektrische Kugel, und an irgend einer Stelle ihres Bereiches ein mit der Einheit der Elektricitätsmenge positiv geladenes Teilchen, so leistet die (unverändert gedachte) elektrische Ladung der Kugel, indem sie das elektrische Teilchen bis zur äufsersten Grenze des Feldes zurückstöfst, eine Arbeit von bestimmter Gröfse; ebenso grofs ist die Arbeit, welche man aufwenden mufs, um das elektrische Teilchen der abstofsenden Kraft entgegen von der äufsersten Grenze des Feldes (also eigentlich aus unendlicher Ferne) oder überhaupt von einer wirkungslosen Stelle des Feldes, z. B. von der Erde, an seine ursprüngliche Stelle zurückzuschaffen. Diese Arbeit ist das Mafs der elektrischen Wirkungsfähigkeit oder potentiellen Energie, welche an dieser Stelle des Feldes herrscht; man nennt sie die elektrische Spannung oder das elektrische Potential in diesem Punkte.

Für alle Punkte, welche den gleichen Abstand von dem Kugelmittelpunkt haben, oder welche in Bezug auf die Kugeloberfläche auf dem gleichen „Niveau“ liegen, hat das elektrische Potential offenbar den nämlichen Wert. Beschreibt man daher aufserhalb der Kugel um ihr Centrum eine Reihe von Kugelflächen mit immer gröfseren Halbmessern, so sind dieselben sämtlich Flächen gleichen Potentials oder Niveauflächen. Auf jeder derselben hat die Spannung ringsum denselben Wert, nimmt aber ab, wenn man nach aufsen hin von einer zur anderen fortschreitet.

Um ein elektrisches Teilchen längs einer Niveaufläche zu verschieben, ist keinerlei Kraftaufwand erforderlich, denn die abstofsende Kraft, welche sich einer Verschiebung widersetzen könnte, ist ja (wegen der Symmetrie) nur in der Richtung von dem Centrum weg thätig und steht somit auf der kugelförmigen Niveaufläche senkrecht. Bringt man dagegen das Teilchen von einer Niveaufläche auf eine andere, so wird hierbei eine Arbeit geleistet oder verbraucht, welche dem Unterschied der entsprechenden Potentialwerte gleich ist, auf welchem Wege übrigens das Teilchen von der einen Fläche zur anderen gelangt sein mag.

Alles dies gilt nicht nur in dem bisher betrachteten einfachen Beispiel der Kugel; wie auch elektrische Körper beschaffen und gelagert sein mögen, immer läfst sich die Verteilung der Spannung oder des Potentials in ihrem Felde durch eine Schar von Niveauflächen veranschaulichen, welche aber im allgemeinen nicht Kugelflächen, sondern krumme Flächen anderer Natur sein werden.

Denkt man sich Linien gezogen, welche die aufeinander folgenden Niveauflächen überall rechtwinklig durchsetzen, so gibt jede derselben in dem Punkte des Feldes, durch welchen sie geht, die Richtung der Kraft an, welche daselbst wirkt. Man nennt sie deshalb Kraftlinien. Bei einer elektrisch geladenen Kugel sind die Kraftlinien Gerade, welche vom Centrum ausstrahlen; im allgemeinen aber sind sie gekrümmt.

Hat die Kraft in einem elektrischen Felde überall die gleiche

Gröſse und Richtung, so sind die Kraftlinien parallele Gerade, und die Niveauflächen zu ihnen senkrechte parallele Ebenen; man nennt alsdann das Feld ein gleichförmiges.

165. **Potentialgefälle.** Geht man von irgend einem Punkte des Feldes um eine sehr kleine Strecke weiter, so nennt man das Verhältnis des kleinen Unterschiedes der Potentialwerte an den Enden der Strecke zu dieser kleinen Strecke selbst das Spannungs- oder Potentialgefälle. Dasselbe drückt die Gröſse der elektrischen Kraft aus, welche in jenem Punkte nach dieser Richtung wirkt. Das Gefälle ist am steilsten in der Richtung der Kraftlinie; in dieser Richtung wirkt die volle elektrische Kraft, in jeder anderen Richtung nur deren entsprechende Komponente; senkrecht zu den Kraftlinien, also längs den Niveauflächen selbst, ist das Gefälle und somit, wie bereits erwähnt, auch die Kraft Null.

Infolge des Gefälles oder der elektrischen Kraft geht ein frei bewegliches positiv geladenes Teilchen stets von Stellen höheren Potentials zu Stellen niedrigeren Potentials über, wie das Wasser von der Schwerkraft getrieben stets vom höheren zum niedrigeren Niveau herabflieſst.

166. **Gleichgewicht in Leitern.** In einem Leiter, auf welchem elektrisches Gleichgewicht eingetreten ist, findet keine Veränderung der elektrischen Verteilung mehr statt; die elektrischen Kräfte und somit auch die Potentialunterschiede sind überall Null, d. h. im Gleichgewichtszustand hat jeder Punkt in und auf dem Leiter das nämliche Potential, oder das Potential ist überall auf dem Leiter konstant. Die Elektricität ordnet sich auf der Oberfläche stets so an, daſs die Spannung oder das Potential durch den ganzen Leiter das gleiche ist.

Die Oberfläche des Leiters ist demnach im Falle des Gleichgewichts eine Fläche gleichen Potentials oder eine Niveaufläche.

167. **Dielektrica.** Da im Innern von Leitern im Gleichgewichtszustand kein Potentialgefälle und somit auch keine Kraft vorhanden ist, so setzen sich die Kraftlinien nicht in das Innere der Leiter fort; sie verbreiten sich nur in den umgebenden Nichtleitern, indem sie senkrecht von den Oberflächen der Leiter ausgehen oder daselbst endigen. Das elektrische Feld umfaſst also, sobald Gleichgewicht eingetreten ist, die von den Leitern eingenommenen Räume nicht, sondern besteht nur aus den von den isolirenden Substanzen erfüllten Zwischenräumen. Faraday hat daher die Nichtleiter Dielektrica genannt, um anzudeuten, daſs in ihnen die elektrischen Kräfte vorhanden sind und sich von Punkt zu Punkt verbreiten.

168. **Elektrische Kapacität.** Stellt man zwischen zwei isolirten Leitern von verschiedener elektrischer Spannung eine leitende Verbindung her, so wird positive Elektricität von dem Körper von höherem Potential auf denjenigen von niedrigerem Potential überströmen, bis das Potential auf beiden Körpern, die durch die Verbindung jetzt zu einem einzigen Leiter vereinigt sind, überall das

gleiche geworden ist, ähnlich, wie sich in zwei mit Wasser gefüllten Gefäßsen, die man durch eine Röhre in Verbindung setzt, das gleiche Niveau herstellt.

Wie aber ein Gefäßs von gröfserem Fassungsraum eine gröfsere Wassermenge aufnehmen mufs, um bis zu einem bestimmten Niveau gefüllt zu werden, so wird auch z. B. eine Kugel von gröfserem Radius eine gröfsere Elektricitätsmenge erfordern, um bis zu einem bestimmten Potential geladen zu werden, als eine kleinere Kugel, d. h. sie hat ein gröfseres elektrisches Fassungsvermögen. Man versteht unter diesem Fassungsvermögen oder der elektrischen Kapacität eines Leiters diejenige Elektricitätsmenge, welche erforderlich ist, um sein Potential um eine Einheit zu erhöhen. Die Elektricitätsmenge $E$, welche ein Leiter beansprucht, um bis zu einem bestimmten Potential $V$ geladen zu werden, ist demnach gleich dem Produkt aus seiner Kapacität $C$ und diesem Potentialwert, oder es ist $E = CV$. Man kann deshalb auch sagen, die Kapacität eines Körpers ist das Verhältnis der auf ihm vorhandenen Elektricitätsmenge zu seinem Potential, oder

$$C = \frac{E}{V} \cdot$$

Die Erde verhält sich wie ein Reservoir von so ungeheuer grofsem Fassungsvermögen, dafs alle künstlich erzeugten Elektricitätsmengen, auf ihre Oberfläche ausgebreitet, ihr Potential nicht merklich zu erhöhen vermögen: ihre Kapacität ist sozusagen unendlich grofs.

Der Begriff der elektrischen Kapacität ist verwandt mit dem Begriff der Wärmekapacität, d. i. der Wärmemenge, welche notwendig ist, um die Temperatur eines Körpers um $1^0$ C. zu erhöhen. Während aber die Wärmekapacität nur von dem Stoff und dem Gewicht des Körpers bedingt ist, ist die elektrische Kapacität von dem Stoff des Leiters unabhängig; sie hängt vielmehr ab von seiner Gröfse und Gestalt, und wird sogar, wie sich bald ergeben wird, durch die Gegenwart anderer Leiter im elektrischen Felde beeinflufst.

169. **Werte des Potentials und der Kapacität.** Das Potential in irgend einem Punkte des Feldes ist seinem absoluten Werte nach nicht bestimmbar; man gibt daher immer den Unterschied von demjenigen der Erde an, deren elektrische Spannung man als Null annimmt, ähnlich, wie man die Angabe von Höhenlagen auf das Niveau des Meeres und Temperaturen auf den Schmelzpunkt des Eises als Nullpunkt bezieht. Ein positiv elektrischer Körper hat alsdann ein positives, ein negativ elektrischer Körper ein negatives Potential; wird z. B. ein negativ geladener Körper mit der Erde leitend verbunden, so strömt von dieser, deren Potential (Null) höher liegt, positive Elektricität auf ihn über, bis er neutral geworden ist und nun ebenfalls das Potential Null hat. Jeder mit der Erde verbundene Leiter hat das Potential Null.

Der Wert des Potentials der in einem Punkte vereinigt ge-

dachten Elektricitätsmenge $e$ auf einen Punkt in der Entfernung $r$, in welchem sich die Einheit der Elektricitätsmenge befindet, ist $e/r$.

Denn die Elektricitätsmenge $e$ wirkt auf die Elektricitätseinheit in der Entfernung $r$ nach dem Coulombschen Gesetz mit der Kraft $e/r^2$, und leistet, indem sie dieselbe um die sehr kleine Strecke $r_1 - r$ bis in die Entfernung $r_1$ abstöfst, die Arbeit

$$\frac{e}{r^2}(r_1 - r).$$

Ist aber, wie vorausgesetzt, $r_1$ nur sehr wenig gröfser als $r$, so kann man statt $r^2$ das Produkt $r r_1$ setzen, mit um so geringerem Fehler, je kleiner man den Schritt $r_1 - r$ wählt. Dann kann diese Arbeit so ausgedrückt werden:

$$\frac{e}{r\, r_1}(r_1 - r) = e\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_1}\right).$$

Geht nun die Bewegung in solchen kleinen Schritten weiter von $r_1$ bis $r_2$, $r_2$ bis $r_3$, ... endlich von $r_{n-1}$ bis $r_n$, so ist die geleistete Gesamtarbeit gleich der Summe

$$e\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \dots + \frac{1}{r_{n-1}} - \frac{1}{r_n}\right)$$

oder

$$e\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_n}\right).$$

Ist die Entfernung $r_n$ unendlich grofs, so ist $1/r_n = 0$, und die Arbeit, welche die Elektricitätsmenge $e$ leistet, indem sie die Elektricitätseinheit bis in unendliche Ferne (bis an die Grenze des Feldes) abstöfst, und welche andererseits aufgewendet werden mufs, um die Elektricitätseinheit aus unendlich grofser Ferne bis in die Entfernung $r$ überzuführen, oder das Potential $V$ ist

$$V = \frac{e}{r}.$$

Wirken beliebig viele elektrische Massen $e$, $e'$, $e''$ ... aus den Entfernungen $r$, $r'$ $r''$ ... auf einen Punkt mit der Elektricitätsmenge 1, so ist das Potential in diesem Punkte:

$$V = \frac{e}{r} + \frac{e'}{r'} + \frac{e''}{r''} + \dots = \sum \frac{e}{r}.$$

Da eine Kugel auf einen äufsersten Punkt ebenso wirkt, als wenn ihre ganze Ladung $E$ im Mittelpunkt vereinigt wäre, so ist ihr Potential auf einen Punkt, der um $r$ von ihrem Centrum absteht:

$$V = \frac{E}{r},$$

vorausgesetzt, dafs $r$ gröfser ist als der Radius $R$ der Kugel. An der Oberfläche der Kugel, wo $r = R$ ist, und daher auch überall in ihrem Innern, hat das Potential den konstanten Wert

$$V = \frac{E}{R}.$$

Die Ladung der Kugel ist demnach:

$$E = R\, V,$$

woraus hervorgeht, daſs die Kapacität einer Kugel gleich ihrem Radius ist (168).

170. **Energie der elektrischen Ladung.** Wird ein anfangs unelektrischer isolirter Leiter geladen, so wird für jede später zugeführte Elektricitätsmenge, indem sie von der bereits vorhandenen Elektricität Abstoſsung erfährt, eine stets wachsende Arbeit erfordert, indem das Potential des Körpers von seinem Anfangswerte Null bis zu seinem Endwerte $V$ zunimmt. Da diese Zunahme des Potentials in demselben Verhältnis fortschreitet wie die Ladung selbst, so wird die pro Einheit der Elektricitätsmenge geleistete Arbeit schlieſslich dieselbe sein, als wenn der Körper während des ganzen Vorganges der Ladung ein konstantes Potential, welches das arithmetische Mittel ist zwischen dem Anfangswerte 0 und dem Endwerte $V$, nämlich $^1/_2\,V$, unverändert beibehalten hätte. Für die Elektricitätseinheit ist diese Arbeit demnach $^1/_2\,V$, und für die Elektricitätsmenge $E$:

$$W = {}^1/_2\,VE,$$

oder auch, da $E = CV$ (unter $C$ die Kapacität des Leiters verstanden) ist:

$$W = {}^1/_2\,CV^2 = {}^1/_2\,\frac{E^2}{C}\,.$$

Diese Arbeit, welche in dem elektrischen Leiter gleichsam aufgespeichert ist und von ihm wieder ausgegeben wird (z. B. als Wärme), sobald er in den unelektrischen Zustand zurückkehrt, nennt man die Energie der elektrischen Ladung oder das Potential des Leiters auf sich selbst.

171. **Elektrische Influenz.** Bringt man in die Nähe (in das Feld) eines elektrischen Körpers, z. B. einer (positiv) geladenen Metallkugel, einen ursprünglich im neutralen Zustand befindlichen Leiter, etwa einen isolirten, an beiden Enden abgerundeten Metallcylinder (Fig. 144), so wird der letztere Körper unter dem Einfluſs oder durch die Influenz (elektrische Verteilung, engl. Induktion) des ersteren ebenfalls elektrisch. Man erkennt dies leicht, wenn man auf die obere Seite des horizontalen Cylinders Streifchen von Goldblatt mit ihrem einen Ende festgeklebt hat, welche dem Cylinder in neutralem Zustande schlaff anliegen, von ihm aber abgestoſsen werden und sich aufrichten, sobald ihm die elektrische Kugel genähert wird; dies geschieht am lebhaftesten an den beiden Enden des Cylinders; dagegen gar nicht an einer Stelle, welche zwischen seinem näheren Ende und seiner Mitte liegt (Indifferenzzone). Nähert

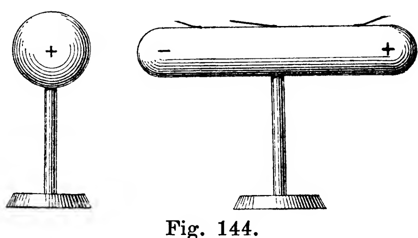


Fig. 144.
Influenz.

Nähert man von oben her eine geriebene Glasstange, so wird von ihr das Goldblatt am genäherten Ende angezogen und steiler aufgerichtet, daſs am entfernteren Ende aber abgestoſsen und niedergedrückt. Am näheren Ende hat sich also die der influirenden Elektricität entgegengesetzte (negative), am entfernteren Ende die gleichnamige (positive) Elektricität angesammelt.

Die Dichte der beiden Elektricitäten ist am gröſsten an den beiden Enden des influirten Leiters, und nimmt von hier aus gegen die Indifferenzzone, wo sie Null ist, stetig ab, wovon man sich durch Probescheibchen überzeugen kann.

Auch auf den ersten Leiter wirkt der zweite zurück, und bewirkt eine Änderung der Anordnung seiner Elektricität, derart, daſs sich dieselbe am dichtesten ansammelt in dem Punkte, der dem zweiten Leiter am nächsten ist.

Auf beiden Leitern muss sich nämlich, damit Gleichgewicht eintrete, die Elektricität so anordnen, daſs die eigene Elektricität des einen Körpers auf jeden seiner Punkte eine Wirkung ausübt, die der Wirkung der Elektricität des anderen Körpers entgegengesetzt gleich ist, so daſs die elektrische Kraft in jedem seiner Punkte Null, oder daſs das Potential auf jedem der beiden Leiter konstant wird. Auf dieser Notwendigkeit beruht das wahre Wesen der Influenz.

Entfernt man den influirenden Körper oder leitet seine Elektricität durch Berührung mit dem Finger in die Erde, so kehrt der influirte Leiter wieder in seinen ursprünglichen neutralen Zustand zurück, was sich durch Zurückfallen der Goldblättchen zu erkennen gibt. Die beiden entgegengesetzten Influenzelektricitäten waren also in gleichen Mengen hervorgerufen worden, und konnten sich deshalb nach Aufhören der Influenz gegenseitig wieder vollständig neutralisiren.

172. **Elektrisirung durch Influenz.** Verbindet man den zweiten Leiter, während er unter dem Einfluſs des ersten steht, mit der Erde, indem man ihn ableitend berührt, so entweicht die (positive) Influenzelektricität zweiter Art, und das Goldblättchen am entfernteren Ende legt sich schlaff nieder; die (negative) Influenzelektricität erster Art aber bleibt und sammelt sich am genäherten Ende zu noch gröſserer Dichte, denn das dortige Goldblättchen steigt noch steiler empor. Dabei bleibt es gleichgiltig, wo man den Leiter berührt; die Influenzelektricität erster Art entweicht selbst dann nicht, wenn man das nähere Ende, wo sie am dichtesten ist, berührt.[1]) Sie kann nicht entweichen, weil sie notwendig ist, um das Gleichgewicht auf dem influirten Leiter aufrecht zu erhalten.

Wird jetzt, nachdem die Verbindung mit der Erde wieder aufgehoben ist, der influirende Körper fortgenommen, so verbreitet sich die (negative) Influenzelektricität erster Art über den ganzen Leiter,

---

[1]) Man sagte deshalb früher, die Influenzelektricität erster Art sei durch die Anziehung der influirenden gebunden.

mit derjenigen Dichte, welche dem Leiter vermöge seiner Form zukommt; es heben sich jetzt die Goldblättchen an beiden Enden gleichstark mit negativer Elektricität; denn eine von oben genäherte geriebene Kautschukstange stöſst sie ab und drückt sie nieder.

Man kann also durch Influenz einen isolirten Leiter laden, ohne ihn mit einem elektrischen Körper in Berührung zu bringen, und zwar mit derjenigen Elektricität, welche der des influirenden Körpers entgegengesetzt ist.

173. **Saugwirkung der Spitzen.** Bringt man am entfernten Ende des influirten Leiters eine Spitze an, so strömt aus ihr die gleichnamige Influenzelektricität aus, und der Leiter bleibt mit der ungleichnamigen Influenzelektricität geladen, als wenn man ihn zur Erde abgeleitet hätte.

Befindet sich die Spitze an dem näheren Ende, so strömt aus ihr ungleichnamige Influenzelektricität gegen den influirenden Körper und neutralisirt teilweise dessen Ladung, der influirte Leiter aber bleibt mit der gleichnamigen Elektricität geladen. Es hat den Anschein, als ob die Spitze Elektricität aus dem ersten Körper in den zweiten hinübersauge, und man spricht daher von einer Saugwirkung der Spitzen. Alle diese Vorgänge werden durch das Verhalten der Goldblättchen deutlich angezeigt.

174. **Schirmwirkung.** Schiebt man zwischen den influirenden Körper und den isolirten Leiter eine zur Erde abgeleitete Metallplatte, so fallen die Goldblättchen nieder; der Leiter kehrt in den neutralen Zustand zurück. Die Influenz erstreckt sich jetzt zunächst auf die Metallplatte, welche auf der Vorderseite sich mit der ungleichnamigen Elektricität bedeckt, auf der Hinterseite aber, weil die gleichnamige Elektricität in die Erde entwich, unelektrisch ist. Der elektrische Körper und die Metallplatte bilden jetzt zusammen eine Vereinigung, auf welcher die Elektricität für sich im Gleichgewicht ist, und jener kann daher durch die Metallplatte hindurch auf einen dahinter befindlichen Leiter nicht wirken. Die von dem elektrischen Körper ausgehenden Kraftlinien endigen an der ihm zugewendeten Seite der Metallplatte und setzen sich in den Raum hinter ihr nicht fort. Die Metallplatte bildet einen Schirm, welcher die hinter ihr befindlichen Körper vor dem Einfluſs des elektrischen Körpers schützt; eine dazwischen geschobene Glasscheibe dagegen schützt nicht; denn sie läſst die Kraftlinien durch, sie ist „dielektrisch“.

Überdeckt man eine isolirte elektrische Kugel mit der oben schon erwähnten Glocke aus Drahtnetz, so daſs sie ringsum von einer leitenden Hülle umgeben ist, so übt sie auſserhalb keinerlei Wirkung aus, falls die Drahthülle zur Erde abgeleitet ist, weil die entgegengesetzte Influenzelektricität auf der Innenseite der Hülle der Elektricität auf der Kugel das Gleichgewicht hält. Ebenso ist auch die Kugel im Innern gegen Einflüsse auſserhalb befindlicher elektrischer Körper geschützt.

Bleibt die leitende Hülle, welche den elektrischen Körper rings umgibt, isolirt, so wird ihre äufsere Oberfläche durch die Influenz des elektrischen Körpers mit diesem gleichnamig, die innere Oberfläche ebenso stark entgegengesetzt elektrisch, und diese Elektricität der Innenfläche hält derjenigen des umschlossenen Körpers das Gleichgewicht, wo sich derselbe im Innern des Hohlraums auch befinden mag; bringt man jetzt den Körper mit der Hülle in Berührung, so wird er vollkommen unelektrisch (vgl. 158); es mufs also die auf der Innenwand hervorgerufene Elektricitätsmenge derjenigen des influirenden Körpers entgegengesetzt gleich gewesen sein, da sie zur Neutralisirung seiner Ladung gerade ausreichte. Demnach ist auch die gleichnamige Elektricitätsmenge auf der Aufsenseite der Hülle derjenigen des influirenden Körpers gleich. Die Wirkung des Körpers aufserhalb ist demnach unabhängig von seiner Lage im Innern immer die nämliche, als ob seine Elektricitätsmenge auf der Aufsenseite der Hülle ausgebreitet werde. Überhaupt erkennt man, dafs die Wirkung beliebig vieler elektrischer Massen aufserhalb einer sie umschliefsenden leitenden Fläche dieselbe ist, als wenn ihre Gesamtmasse auf dieser Fläche ausgebreitet wäre (Faraday).

175. **Erklärung elektrischer Erscheinungen durch Influenz.** Die anfangs erwähnten Anziehungserscheinungen finden erst durch die Influenz ihre vollständige Erklärung. Nähert man einer isolirt aufgehängten Holundermarkkugel einen geriebenen Glasstab, so wird das Kügelchen an seiner Vorderseite negativ, an seiner Hinterseite positiv elektrisch; weil die negative Seite dem Glasstab näher ist, so überwiegt die Anziehung, das Kügelchen kommt mit dem Glasstab in Berührung, seine durch Influenz geweckte negative Elektricität neutralisirt sich mit einer gleich grofsen Menge positiver Elektricität des Glasstabes, und jetzt wird das Kügelchen, dafs nur noch die positive Influenzelektricität enthält, von der Glasstange abgestofsen. Bei der Berührung hat also keine eigentliche Mitteilung gleichnamiger Elektricität, wie es den Anschein hatte, stattgefunden, sondern nur ein Ausgleich der ungleichnamigen Influenzelektricität mit einer gleich grofsen Elektricitätsmenge des elektrischen Körpers. Von einem stark elektrischen Körper kann sogar ein gleichnamig elektrisches Kügelchen angezogen werden, wenn die Anziehnng der näheren ungleichnamigen Influenzelektricität die Abstofsung der bereits vorhandenen und der neu erregten gleichnamigen Elektricität übertrifft.

Ist das Kügelchen an einem leitenden Faden aufgehängt, so wird es lebhafter angezogen, als wenn es isolirt ist, weil jetzt die gleichnamige Influenzelektricität sofort entweicht und sonach der Anziehung nicht entgegenwirken kann. Nachfolgende Abstofsung kann in diesem Falle offenbar nicht eintreten.

176. **Elektroskope.** Auf Influenz beruht auch der Gebrauch eines Pendelpaares, d. h. zweier leichter nebeneinander aufgehängter

leitender Pendel, z. B. Strohhälmchen, Gold- und Aluminiumblättchen, als „Elektroskop“ zum Erkennen des elektrischen Zustandes der Körper.

Das Goldblattelektroskop (Fig. 145) besteht aus einem in ein Glasröhrchen mit Schellack eingekitteten Messingstäbchen, welches oben eine Kugel oder Platte, unten als Pendelpaar zwei Streifchen aus Blattgold trägt. Um die Pendel vor Luftströmungen zu schützen und zugleich den Metallkörper zu isoliren, ist das Röhrchen mittels eines Korkes oder einer eingekitteten Metallfassung in den Hals eines Glasgefäſses eingesetzt. Hält man einen elektrischen Körper, z. B. einen geriebenen Glasstab, in einiger Entfernung über die Platte, so gehen die Pendel auseinander mit positiver Elektricität; der positiv elektrische Glasstab übt nämlich Influenz auf den isolirten Metallkörper des Elektroskops, indem er positive Elektricität in das Pendelpaar treibt, negative in die Platte heranzieht. Entfernt man den Glasstab, so fallen die Pendel zusammen, weil die getrennten Elektricitäten sich wieder neutralisiren. Berührt man aber bei Gegenwart des Glasstabes die Platte mit dem Finger, so entweicht die positive Influenzelektricität und die Pendel fallen zusammen, die negative Influenzelektricität aber bleibt in der Platte verdichtet zurück. Wird nun nach Wegnahme des Fingers auch der Glasstab entfernt, so verbreitet sich diese negative Elektricität über den ganzen Metallkörper und die Goldstreifen weichen nun dauernd auseinander. Das Elektroskop ist jetzt durch die Influenz des positiven Glasstabes mit negativer Elektricität geladen. Mittels einer geriebenen Kautschukstange läſst es sich auf dieselbe Weise positiv laden. Nähe rtman dem negativ geladenen Elektroskop den Glasstab wieder, so gehen die Goldblättchen mehr zusammen, weil der Glasstab durch seine neuerdings geübte Influenz positive Elektricität in die Pendel treibt und negative aus ihnen herauszieht, und somit ihre negative Ladung vermindert; nähert man dagegen den negativ elektrischen Kautschukstab, so wird eine neue Menge negativer Elektricität in die Blättchen getrieben, und sie gehen weiter auseinander. Das geladene Elektroskop gibt also nicht bloſs über das Vorhandensein von Elektricität auf dem zu prüfenden Körper, sondern auch darüber Aufschluſs, ob diese Elektricität positiv oder negativ ist, da die Blättchen im ersteren Fall bei positiver, im letzteren Fall bei negativer Ladung des Elektroskops weiter auseinander fahren. Aus dem Zusammengehen der Blättchen dagegen kann man noch nicht schlieſsen, daſs ein genäherter Körper elektrisch geladen ist; denn die Blättchen gehen auch zusammen, wenn man die Hand oder einen anderen unelektrischen Leiter dem geladenen

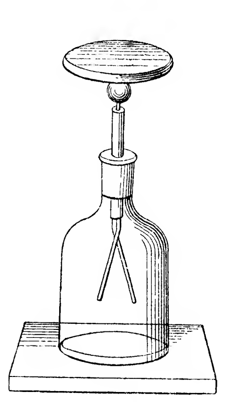


Fig. 145.
Goldblattelektroskop.

Elektroskope nähert. Die auf dem Metallkörper des Elektroskops verbreitete Elektricität wirkt nämlich durch Influenz auf die Hand, deren ungleichnamige Influenzelektricität einen Teil der Ladung des Apparats auf der Platte verdichtet, wodurch die gegenseitige Abstoſsung der Goldblättchen geschwächt wird.

177. **Elektrophor.** Um stärkere elektrische Ladungen zu erzielen, als es durch die bisher erwähnten Mittel möglich ist, kann man sich des Elektrophors (Wilke, 1762) bedienen. Eine Scheibe von Harz oder Kautschuk, der Kuchen (*g*, Fig. 146), ist in eine metallene Form *nn* gegossen oder in einen metallenen Teller gelegt. Der Kuchen wird durch Reiben mit Katzenpelz oder Fuchsschwanz negativ elektrisch gemacht. Seine negative Elektricität wirkt durch Influenz auf die metallene Unterlage, die abgestoſsene negative Elektricität entweicht in die Erde, die positive Influenzelektricität dagegen wird nach der unteren Fläche des Kuchens hingezogen und geht zum Teil auf sie über. Diese positive Elektricität der Unterseite des Kuchens hält die negative seiner Oberseite fest und verhindert sie, sich zu zerstreuen oder auf einen leitenden Körper, den man mit ihr in Berührung bringt, überzugehen. Denn setzt man den Deckel oder Schild (*p*), eine mit isolirendem Stoff (*m*) versehene Metallplatte, auf den Kuchen und hebt den Schild, ohne ihn zu berühren, isolirt empor, so erweist er sich, am Elektroskop geprüft, als unelektrisch. Hat man ihn aber, während er noch auf dem Kuchen lag, mit dem Finger berührt, so zeigt er sich nach dem Aufheben stark mit positiver Elektricität geladen. Die negative Elektricität der Oberfläche des Kuchens zieht nämlich durch ihre Influenz positive Elektricität nach der Unterseite des Deckels und treibt negative nach seiner Oberseite; hebt man den Deckel ab, ohne ihn berührt zu haben, so vereinigen sich diese beiden gleichen Elektricitätsmengen wieder, und der Deckel ist unelektrisch. Berührt man ihn aber vor dem Aufheben mit dem Finger, so entweicht die abgestoſsene negative Elektricität in die Erde, die positive Influenzelektricität erster Art aber bleibt auf der Unterseite des Deckels zurück. Hebt man jetzt, nachdem man den Finger entfernt hat, den Deckel isolirt empor, so verbreitet sich diese positive Elektricität, dem Einfluſs des Kuchens entzogen, über die ganze Oberfläche des Deckels. Da bei diesem Verfahren dem Kuchen keine Elektricität entzogen wird, so kann man dasselbe beliebig oft mit dem gleichen Erfolg wiederholen, und sonach Elektricität in unerschöpflicher Menge gewinnen. Dabei wird aber die Elektricität nicht etwa aus nichts gewonnen, sondern man hat, indem man beim Aufheben des positiv elektrischen Deckels die zwischen ihm und dem negativ elektrischen Kuchen stattfindende

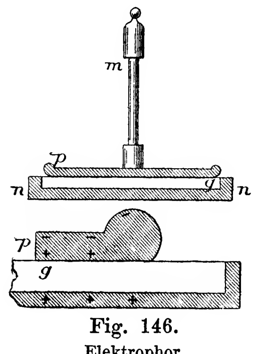


Fig. 146.
Elektrophor.

Anziehung überwindet, eine Arbeit zu leisten, welche als elektrische Energie in dem Deckel aufgespeichert ist.

178. **Die Elektrisirmaschine** (Otto von Guericke, 1663, Hausen, Bose, Winkler, 1743—45) dient dazu, Elektricität von gröfserer Spannung (höherem Potential) durch Reibung zu erzeugen. Eine auf wagrechter gläserner und von einer Stütze *h* (Fig. 147) getragener Achse *i* befestigte Glasscheibe *A* wird, wenn man sie mittels einer Kurbel *K* in der Richtung des Pfeiles dreht, zwischen zwei federnd gegen sie drückenden Lederkissen *cc* durchgezogen und dadurch an denselben gerieben. Die Reibkissen sind, um die Elektricitätserregung zu erhöhen, durch Kienmayersches Amalgam, eine Mischung von 1 Teil Zinn und 1 Teil Zink mit 2 Teilen Quecksilber, metallisch gemacht. Beim Reiben wird die Glasscheibe positiv, das Reibzeug negativ elektrisch; die negative Elektricität des Reibzeugs wird durch eine Kette oder einen Draht *m* zur Erde geleitet, weil ihr Verbleiben auf dem Reibzeug die weitere Erregung positiver Elektricität auf der Glasscheibe hindern würde. Diese letztere, auf der Glasscheibe haftend und durch Streifen (*e*) aus einem nichtleitenden Stoff, Wachstaft oder Seide, am Entweichen in die Luft gehindert, gelangt beim Weiterdrehen zwischen zwei Holzringe *bb*, welche an dem Konduktor (*a*), einer auf einem Glasfufs (*g*) isolirt aufgestellten hohlen Messingkugel, leitend befestigt sind. An den Holzringen sind auf ihren nach der Glasscheibe gekehrten Seiten in einer mit Stanniol ausgekleideten Rinne metallene Spitzen angebracht. Die positive Elektricität der Glasscheibe wirkt nun durch Influenz auf den aus Metallkugel und Holzringen bestehenden isolirten Leiter *ab*, treibt positive Elektricität auf die Kugel und zieht negative in die Spitzen; aus diesen aber strömt letztere gegen die Scheibe und wird, indem sie sich mit deren positiver Elektricität vereinigt und die Scheibe wieder unelektrisch macht, beseitigt. Der Konduktor bleibt also mit positiver Elektricität geladen, welche an Menge der positiven Elektrität gleich ist, die durch die Ausströmung der Spitzen auf der Scheibe vernichtet wurde; da der Erfolg derselbe ist, als ob die Spitzen die positive Elektricität der Glasscheibe eingesogen und dem Konduktor zugeführt hätten, so bezeichnet man die Holzringe als Saugvorrichtung. Um nach Belieben auch die negative Elektricität des Reibzeugs benutzen zu können, ist dasselbe mit einer von einem Glasfufs *g* getragenen hohlen Messingkugel *a'* als negativem Konduktor

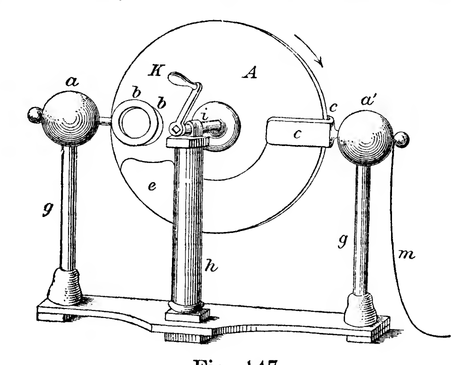


Fig. 147.
Elektrisirmaschine.

verbunden; auf diesem sammelt sich negative Elektricität, wenn man ihn isolirt läfst und den positiven Konduktor *a* zur Erde ableitet.

Mit der Elektrisirmaschine lassen sich zahlreiche Versuche anstellen, welche geeignet sind, das Verhalten der Elektricität zu erläutern, und dabei nicht selten die Form ergötzlicher Spielerei annehmen. So zeigt man die Abstofsung gleichnamig elektrischer Körper mit dem Papierbüschel (Fig. 148), das an einem leitenden Stäbchen befestigt und auf den Konduktor der Elektrisirmaschine gesteckt, beim Drehen der Maschine sich schirmartig auseinander breitet.

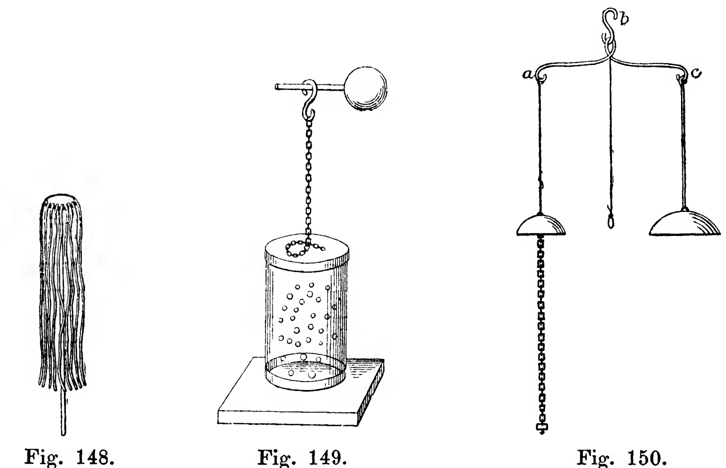



Fig. 148. Papierbüschel. Fig. 149. Korkkugeltanz. Fig. 150. Elektrisches Glockenspiel.

Der Korkkugeltanz erläutert die Anziehung und Elektrisirung unelektrischer Körper durch elektrische; in einem oben und unten durch Metalldeckel geschlossenen Glascylinder (Fig. 149) befinden sich Kügelchen aus Kork oder Holundermark, eine vom Konduktor herabhängende Kette leitet Elektricität auf den oberen Deckel, dieser zieht die unelektrischen Kügelchen an, stöfst sie wieder ab, nachdem sie in Berührung mit ihm gleichnamig elektrisch geworden sind, zieht sie von neuem an, nachdem sie an die untere, mit der Erde leitend verbundene Metallplatte ihre Elektricität abgegeben haben, und so tanzen sie zwischen Deckel und Boden auf und ab, indem sie den Übergang der Elektricität vom Konduktor zur Erde vermitteln.

In derselben Weise pendelt beim elektrischen Glockenspiel das an einem Seidenfädchen hängende Kügelchen zwischen der isolirt aufgehängten und mit der Elektrisirmaschine verbundenen Glocke *c* und der mittels der Kette zur Erde abgeleiteten Glocke *a* hin und her.

Man kann seinen eigenen Körper elektrisch machen (Dufay, 1734), wenn man sich auf den Isolirschemel, ein von Glasfüfsen getragenes Brett, oder auf eine Kautschukplatte stellt, oder Gummi-

überschuhe anzieht und dabei den Konduktor berührt. Die Haare sträuben sich empor und zeigen im Dunkeln Lichtbüschel an ihren Spitzen, sie fallen wieder zusammen, sobald der Konduktor oder der menschliche Körper ableitend berührt wird.

Die Dampf- oder Hydroelektrisirmaschine von Armstrong (1830) gründet sich darauf, dafs der aus dem Hahn eines Dampfkessels ausströmende Wasserdampf elektrisch (gewöhnlich positiv), der Kessel, wenn isolirt, entgegengesetzt elektrisch ist. Diese Elektricität entsteht durch Reibung der von dem Dampf mitgerissenen Wasserteilchen an den Wänden (am besten Holz) des Ausströmungsrohrs (Faraday, 1846). Auf dieselbe Weise wird auch flüssige Kohlensäure beim Ausströmen aus der zu ihrer Aufbewahrung dienenden eisernen Flasche elektrisch.

179. **Elektrischer Funke. Schlagweite.** Nähert man dem Konduktor einer Elektrisirmaschine oder einem anderen geladenen Leiter einen zweiten Leiter, so sieht man bei gröfserer Entfernung der beiden einen Funken zwischen ihnen überspringen. Bei wachsender Annäherung der beiden Körper häufen sich nämlich in Folge der gegenseitigen Influenz an den einander zugekehrten Stellen der Leiter entgegengesetzte Elektrizitäten in wachsender Dichte an, bis schliefslich ihr Druck so grofs wird, dafs die isolirende Luftschicht zwischen ihnen momentan durchbrochen wird. Die Elektricitäten gleichen sich dann in dem entstandenen leitenden Kanale aus und erhitzen die Luft bis zum Glühen, indem die Energie der aufgesammelten Ladungen sich in Wärme umsetzt. Ist der zweite Leiter zur Erde abgeleitet, so entladet sich der erste Leiter durch den Funken hindurch.

Der Abstand, in dem die Funkenbildung eintritt, die sogenannte Schlagweite, hängt von der Differenz der Spannungen oder der Potentiale ab, die zwischen den Leitern besteht. Zur Messung der Schlagweite bedient man sich des Funkenmikrometers von Riefs (1837). Dieses besteht aus zwei Metallkugeln auf isolirenden Trägern aus Glas oder Hartgummi, von denen der eine feststeht, während der andere auf einem Schlitten längs eines Mafsstabes mittels einer feinen Mikrometerschraube verschoben werden kann. Die Schlagweite ist der Spannung bei kleinen Entfernungen angenähert proportional. Doch gilt diese Beziehung nicht genau; vielmehr wächst die Schlagweite etwas stärker als die Spannung. Kennt man die Beziehung zwischen beiden, so kann man Potentialdifferenzen mittels der Schlagweite messen, die sie zu durchbrechen vermögen.

180. **Ansammlungsapparate (Kondensatoren).** Setzt man einen isolirten Leiter, z. B. eine auf Glasfufs stehende vertikale Metallplatte, mit dem Konduktor der arbeitenden Elektrisirmaschine in Verbindung, so wird die Platte eine ihrer Kapacität entsprechende Elektricitätsmenge aufnehmen, bis auf ihr dieselbe Spannung (dasselbe Potential) erreicht ist wie auf dem Konduktor. Damit ist der weiteren Aufnahme von Elektrizität eine Grenze gesetzt, was man

daran erkennt, daſs ein auf der Rückseite der Platte anfangs schlaff herabhängendes Pendel nicht weiter steigt. Stellt man, nachdem die Verbindung mit dem Konduktor aufgehoben ist, der Vorderseite der Platte eine ebensolche gegenüber, so sinkt das Pendel um so mehr zurück, je näher man die zweite Platte bringt, und das auf der Rückseite der letzteren hängende Pendel steigt, jedoch weniger hoch als das an der ersten Platte. Diese übt nämlich Influenz aus auf jene, zieht negative Influenzelektricität auf die ihr zugewendete Vorderseite und treibt positive Influenzelektricität auf ihre Rückseite. Indem die positive Elektricität der ersten Platte, von der gegenüberstehenden negativen Influenzelekricität angezogen, sich mit gröſserer Dichte auf ihrer Vorderseite anhäuft, wird die Dichte auf der Hinterseite geringer, und mit ihr die auf das Pendel geübte abstoſsende Kraft. Wird jetzt die erste Platte wieder mit dem Konduktor verbunden, so geht von neuem Elektricität auf sie über, welche sich der bereits vorhandenen hinzufügt, das Pendel steigt wieder bis zur früheren nicht überschreitbaren Höhe, und zeigt dadurch an, daſs die auf dem Konduktor herrschende Spannung abermals erreicht ist. Es geht daraus hervor, daſs das Potential der ersten Platte durch die Rückwirkung der zweiten erniedrigt worden war. Die erste Platte enthält aber jetzt eine gröſsere Elektricitätsmenge, als sie vorhin für sich aufzunehmen vermochte; ihre Fähigkeit, Elektricität aufzunehmen, oder ihre Kapacität, ist also durch die Gegenwart der zweiten Platte erhöht worden.

Berührt man jetzt die zweite Platte ableitend, so entweicht aus ihr die positive Influenzelektricität, ihr Pendel sinkt schlaff herab, ihr Potential wird Null; die negative Influenzelektricität aber, der jene positive nun nicht mehr entgegenwirkt, verdichtet sich auf der Vorderseite und zieht auch noch mehr von der positiven Ladung der ersten Platte nach deren Vorderseite, und das Pendel auf ihrer Rückseite geht zurück. Man kann jetzt abermals Elektricität von dem Konduktor auf diese Platte überführen, bis die Spannung des Konduktors wieder erreicht ist. Die Kapacität der ersten Platte wird also durch die ihr gegenüberstehende zweite Platte noch mehr erhöht, wenn die letztere zur Erde abgeleitet ist.

Zwei Metallplatten, welche durch eine nicht leitende Schicht (Luft, Glas, Schellack u. s. w.) getrennt sind, und deren eine mit der Elektricitätsquelle, die andere mit der Erde verbunden wird, bilden also einen Ansammlungsapparat oder Kondensator, mittels welchen sich die Elektricität in gröſserer Menge anhäufen und verdichten läſst, als auf einer Platte allein möglich wäre; jene Platte heiſst die Kollektor-, diese die Kondensatorplatte.

Von dem Kondensator kann man Gebrauch machen, um Elektricität von so geringer Spannung, daſs sie unmittelbar auf das Elektroskop nicht merklich wirkt, in meſsbarer Menge anzuhäufen. Beim Kondensator von Volta (1782) ist die horizontale Kollektorplatte unmittelbar auf den Stiel eines Goldblatt-Elektroskops (Fig. 151) aufgeschraubt,

während die Kondensatorplatte mittels eines isolirenden Glasstiels auf sie aufgesetzt werden kann. Auf den einander zugekehrten Flächen sind die Platten gefirnist und demnach durch eine dünne Harzschicht voneinander getrennt. Bringt man die untere Platte mit einem schwach elektrischen Körper in Verbindung und berührt die obere ableitend mit dem Finger, so verdichten sich die beiden entgegengesetzten Elektricitäten auf den einander zugekehrten Flächen der Platten zu beiden Seiten der Firnisschicht, bis auf der Kollektorplatte das Potential jenes Körpers erreicht ist. Hebt man dann die obere Platte ab, so verbreitet sich die in der unteren Platte zunächst der Harzschicht angehäufte Elektricitätsmenge über den ganzen Metallkörper des Elektroskops, und lädt denselben, da seine Kapacität nach Entfernung der Kondensatorplatte wieder auf die ursprüngliche geringe Gröfse herabgesunken ist, zu weit höherer Spannung, als dem zu prüfenden Körper eigen war, was sich durch Auseinanderweichen der Goldblättchen verrät.

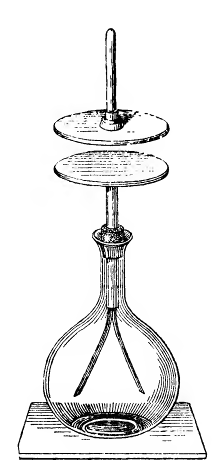


**Fig. 151.**
Goldblatt-Elektroskop mit Kondensator.

Der Luftkondensator von R. Kohlrausch (1833) besteht aus zwei vertikalen Platten mit Luft als isolirender Zwischenschicht.

Die Kapacität eines Kondensators ist der Oberfläche der Platten direkt, ihrem Abstande umgekehrt proportional.

Ist nämlich $V$ das Potential der Kollektor-, $V'$ dasjenige der Kondensatorplatte, und $d$ die Dicke der Luftschicht dazwischen, so ist $(V - V')/d$ das Potentialgefälle von der ersten zur zweiten Platte, also die Kraft, welche die Elektricität von jener gegen diese zu treiben strebt. Diese Kraft wird aber auch ausgedrückt durch $4\pi\delta$, wenn $\delta$ die Dichte der dort vorhandenen Elektricität bezeichnet. Es mufs also

$$4\pi\delta = \frac{V - V'}{d}$$

sein. Da $d$ konstant ist und $V - V'$ als Spannungsunterschied zwischen zwei Niveauflächen ebenfalls, so ist auch $\delta$ konstant, und $E = S\delta$ ist die auf der Oberfläche $S$ der Platte angesammelte Elektricitätsmenge. Multiplizirt man nun die vorige Gleichung beiderseits mit $S$ und dividirt mit $4\pi$, so erhält man:

$$E = \frac{S}{4\pi d}(V - V'),$$

oder, wenn die Kondensatorplatte zur Erde abgeleitet ($V' = 0$) ist:

$$E = \frac{S}{4\pi d} V.$$

Die Kapacität des Kondensators ist demnach $\frac{S}{4\pi d}$.

181. **Leidener Flasche. Franklinsche Tafel.** Um die Elektricität starker Quellen, z. B. der Elektrisirmaschine, in gröfserer

Menge anzusammeln, dient die Leidener oder Kleistsche Flasche (Kleist, 1745, Cunaeus, 1746). Sie besteht aus einem Glasgefäfs, welches innen und aufsen bis etwa handbreit vom Rande mit Stanniol (Zinnfolie) beklebt ist, und bildet somit einen Kondensator mit Glas als isolirender Zwischenschicht. Der nicht mit Stanniol bekleidete obere Teil des Gefäfses ist behufs besserer Isolirung gefirnist; durch einen ebenfalls gefirnisten Holzdeckel geht ein oben in eine Kugel endigender Metallstab, welcher unten mit der inneren Belegung in leitender Berührung steht. Die Flasche wird geladen, wenn man die eine Belegung, gewöhnlich die innere, mit der Elektricitätsquelle

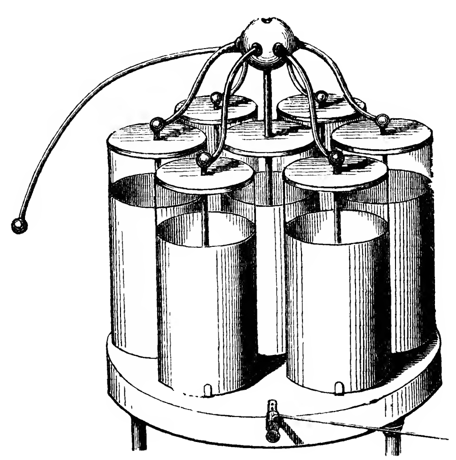


Fig. 152.
Elektrische Batterie.

(Konduktor der Elektrisirmaschine, Deckel des Elektrophors) verbindet, und die andere Belegung zur Erde ableitet, was für die äufsere Belegung ohnehin schon stattfindet, wenn die Flasche auf leitender Unterlage steht. Die beiden Elektricitäten, die zugeleitete (z. B. positive) innen, die negative Influenzelektricität auf dem äufseren Beleg, stehen sich auf den zugewendeten Seiten der Belege einander gegenüber, jene mit der Spannung des Konduktors, diese ohne Spannung (mit dem Potential Null), und sind bestrebt, sich miteinander zu vereinigen, was auch manchmal, wenn die Glaswand der in ihr wirkenden elektrischen Spannung nicht zu widerstehen vermag, unter Durchbohrung derselben geschieht, wodurch die Flasche natürlich unbrauchbar wird. Je gröfser die Oberfläche der Belegung ist, desto gröfser ist das Fassungsvermögen der Flasche, und um so gröfsere Elektricitätsmengen kann man in ihr anhäufen. Anstatt einer sehr grofsen Flasche, welche unbequem sein würde, bedient man sich der elektrischen Batterie (Fig. 152), welche aus mehreren Leidener Flaschen derart zusammengestellt ist, dafs alle äufseren Belegungen einerseits und alle inneren Belegungen andererseits miteinander verbunden sind.

Der Fortgang der Ladung kann verfolgt werden durch Beobachtung des Henleyschen Quadrantenelektroskops (1774), das auf den Konduktor oder die Batterie selbst gesteckt wird. Es besteht aus einem vertikalen Metallsäulchen, an welchem aus der Mitte eines geteilten Gradbogens ein an einem steifen Draht steckendes Holundermarkkügelchen herabhängt; dieses steigt und bleibt endlich stehen, sobald das Potential des Konduktors und damit die obere Grenze der Ladung erreicht ist.

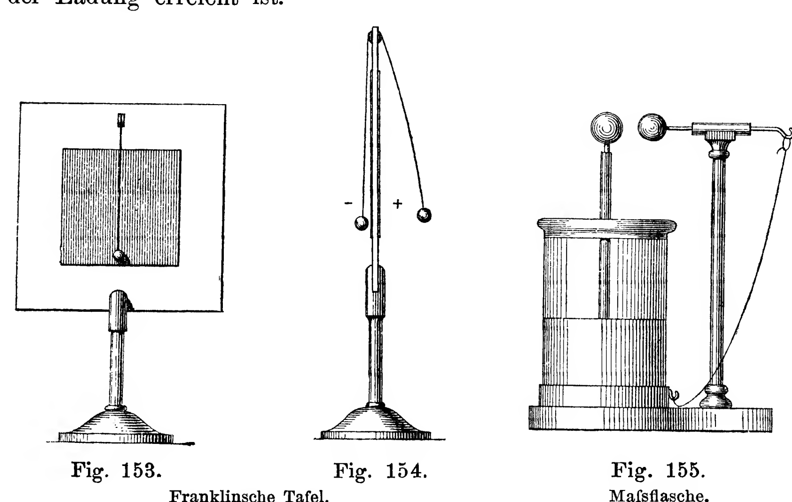



Fig. 153. Fig. 154.
Franklinsche Tafel.

Fig. 155.
Maſsflasche.

Von der Leidener Flasche im Wesen nicht verschieden ist die Franklinsche Tafel (Fig. 153 u. 154), eine Glasplatte, welche senkrecht auf einem Glasfuſs steht und auf beiden Seiten mit Stanniol belegt ist, so daſs das mit Schellackfirnis überzogene Glas am Rande ungefähr handbreit frei bleibt. Für die besprochenen Anwendungen weniger bequem als die Leidener Flasche, eignet sich dieser Ansammlungsapparat wegen seiner einfachen Anordnung besser zur Erläuterung der Vorgänge bei der Ladung und Entladung. Klebt man auf jede Seite der Tafel mit etwas Wachs ein elektrisches Pendel, so wird das eine von der ersten Belegung, auf welche man Elektricität vom Konduktor überführt, abgestoſsen, auf der anderen Seite aber, die man mit dem Finger berührt, hängt es schlaff herab; auf der ersten Belegung befindet sich also Elektricität auch auf ihrer Auſsenseite, auf der zweiten nicht. Läſst man jetzt letztere isolirt, und berührt die erste Belegung, so entweicht die Elektricität von ihrer Auſsenseite, das Pendel daselbst sinkt schlaff herab, und das an der zweiten Belegung steigt, indem ein Teil der an ihrer Innenseite verdichteten negativen Elektricität sich auf die Auſsenseite begibt. Indem man so abwechselnd die beiden Belege berührt, kann man die Tafel allmählich entladen, indem bei jeder Berührung die auf den Belegungen zurückbleibenden Ladungen in gleichem Verhältnis (nach einer geo-

metrischen Progression) abnehmen. Man kann diese successive Entladung übrigens auch an einer Leidener Flasche zeigen, wenn man ihren äufseren Beleg und den Knopf des inneren je mit einem Pendel versieht und die geladene Flasche auf eine isolirende Unterlage stellt.

182. **Mafsflasche.** Zur relativen Messung der in einer Leidener Flasche oder Batterie angesammelten Elektricitätsmenge dient die Mafsflasche von Lane (1767); ihrem Kopf *a* (Fig. 155) steht die von einem wagrechten Metallstäbchen getragene Kugel *b* gegenüber, deren Abstand von *a* durch Verschiebung des Stäbchens beliebig geregelt werden kann. Der Kopf *a* wird mit der äufseren Belegung der zu ladenden gröfseren Flasche oder Batterie, während diese auf isolirender Unterlage steht, in Verbindung gesetzt; die von der Belegung fortgestofsene gleichnamige Influenzelektricität geht nun in die Lanesche Flasche und lädt dieselbe, bis die in ihr angesammelte Elektricität dicht genug geworden ist, um sich durch einen zwischen *a* und *b* überspringenden Funken zu entladen; dabei geht soviel Elektricität zur Erde, als nötig war, um die Mafsflasche auf die der gewählten Schlagweite entsprechende Potentialdifferenz zu laden. Während die Ansammlung der Elektricität in der zu ladenden Batterie fortschreitet, lädt und entlädt sich die Mafsflasche immer wieder von neuem, und die Batterie enthält schliefslich die zur Sättigung der Mafsflasche erforderliche Elektricitätsmenge so vielmal, als Entladungen der letzteren gezählt wurden.

183. **Kaskadenbatterie.** Setzt man $n$ Leidener Flaschen je von der Kapacität $C$ zu einer Batterie zusammen, so ist deren Kapacität $nC$, und um sie bis zur Spannung $V$ zu laden, ist die Elektricitätsmenge $E = nCV$ erforderlich.

Man kann die $n$ Flaschen aber auch so verbinden, dafs jede auf isolirender Unterlage steht und der äufsere Beleg einer jeden mit dem inneren der folgenden verbunden ist. Wird nun dem inneren Beleg der ersten die Elektricitätsmenge $e$ zugeführt, so geht eine (nahezu) gleiche Menge gleichnamiger Elektricität von ihrem äufseren Beleg in die zweite, von deren Aufsenseite in die dritte u. s. w., so dafs jede der Flaschen die nämliche Elektricitätsmenge $e$ aufnimmt. Sind $V_1, V_2, V_3, \ldots V_n$ der Reihe nach die Potentiale der inneren, folglich $V_2, V_3, \ldots V_n, V_{n+1}$ diejenigen der äufseren Belege, so sind die Ladungen der einzelnen Flächen:

$$e = C(V_1 - V_2), \quad e = C(V_2 - V_3), \quad e = C(V_n - V_{n+1}),$$

also die Gesamtladung der ganzen Batterie: $ne = C(V_1 - V_{n+1})$, oder, wenn die äufsere Belegung der letzten Flasche zur Erde abgeleitet ist ($V_{n+1} = 0$):

$$ne = CV_1 \quad \text{oder} \quad e = \frac{C}{n} V_1.$$

Die Kapacität einer solchen Batterie ist hiernach $n$ mal so klein als die jeder einzelnen Flasche: man braucht daher, um eine bestimmte Spannung zu erreichen, nur den $n$ten Teil der Elektricitätsmenge wie bei der einzelnen Flasche, oder, was dasselbe ist, mit einer gegebenen Elektricitätsmenge kann man die $n$fache Spannung erreichen. Da die Potentialdifferenzen

$$V_1 - V_2 = V_2 - V_3 = \ldots = \frac{e}{C}$$

in gleichen Abstufungen auf die einzelnen Flaschen verteilt sind, wie die Gefälle eines staffelförmigen Wasserfalles, so nennt man diese Zusammenstellung Kaskadenbatterie (Franklin, 1784), und sagt, ihre Flaschen seien „auf Spannung“ (hintereinander) gekoppelt, diejenigen der gewöhnlichen Batterie dagegen „auf Quantität“ (nebeneinander). Um hohe Spannung und damit grofse Schlagweite zu erzielen, ist es vorteilhaft, die Batterie auf Quantität gekoppelt zu laden und sie dann auf Spannung oder in Kaskade umzuschalten.

Die Lanesche Mafsflasche ist mit der Flasche, deren Ladung gemessen werden soll, „in Kaskade“ verbunden.

184. **Dielektricitätskonstante.** Bringt man zwischen zwei durch eine Luftschicht getrennte Metallplatten (180), deren eine bis zur Spannung des Konduktors der Elektrisirmaschine geladen, die andere zur Erde abgeleitet ist, eine Platte aus Glas oder Hartkautschuk, so sinkt das Pendel an jener Platte; durch die Gegenwart der dielektrischen Platte ist also die Spannung der Kollektorplatte vermindert, und die Kapacität des Ansammlungsapparats erhöht worden. Es kann also jetzt von neuem Elektricität auf den Apparat übergeführt und seine Ladung vergröfsert werden. Die zwischen den Belegungen eines Ansammlungsapparats befindliche isolirende Schicht verhält sich also nicht passiv, sondern spielt bei der Ladung des Kondensators eine wesentliche Rolle (Franklin), welche für verschiedene Dielektrica verschieden ist (Faraday). Man nennt spezifisches Influenzvermögen (spezifische induktive Kapacität nach Faraday) oder Dielektricitätskonstante einer isolirenden Substanz das Verhältnis der Ladung eines Kondensators, wenn diese Substanz die Belegungen trennt, zu derjenigen Ladung, welche der Kondensator bis zu dem gleichen Potential geladen annimmt, falls das Zwischenmittel eine gleichdicke Luftschicht ist; oder die Dielektricitätskonstante eines isolirenden Körpers ist die Zahl, mit welcher man die Kapacität eines Luftkondensators multipliziren mufs, um diejenige desselben Kondensators zu erhalten, wenn in ihm die Luftschicht durch das betreffende Dielektricum ersetzt ist. Hiermit ist die Dielektricitätskonstante der Luft = 1 angenommen; für einige andere Dielektrica ergeben sich alsdann folgende Werte (Boltzmann, 1874): Paraffin 2,32; Glas 2,6; Hartkautschuk (Ebonit) 3,15; Schwefel 3,84; Glimmer 8 (Bouty). Da auch die verschiedenen Gase verschiedene Influenzvermögen besitzen, so hat man eigentlich dasjenige des luftleeren Raumes = 1 zu setzen; die Dielektricitätskonstanten einiger Gase sind alsdann bei normalem Druck: Wasserstoff 1,0003; Luft 1,0006; Kohlendioxyd 1,0009, und zeigen nur geringe Abweichungen von der Einheit, welche praktisch nicht in Betracht kommen.

Bezeichnet man mit $k$ die Dielektricitätskonstante der Zwischenschicht eines Kondensators, so ist beim Potential $V$ seine Ladung $E = k \frac{S}{4\pi d} V$ und seine Kapacität $kS/4\pi d$.

185. **Dielektrische Polarisation.** Man hat den beschriebenen Einflufs der isolirenden Zwischenschicht auf die Influenzerscheinungen in folgender Weise zu erklären gesucht. Man denkt sich die

kleinsten Teilchen, aus denen der Nichtleiter besteht, als kleine leitende Körperchen, die aber nicht miteinander in Verbindung stehen. Wirkt dann eine elektrische Kraft auf den Nichtleiter, so wird sich jedes Teilchen wie ein isolirter leitender Körper verhalten. In Richtung der elektrischen Kraft werden sich elektrische Ladungen entgegengesetzter Art (Influenzelektricität) an den Enden des Teilchens ansammeln, jedes Teilchen wird so zwei Pole erhalten, oder „polarisirt“ werden. Diese influenzirten Ladungen gehen nicht von Teilchen zu Teilchen über, da ja die Teilchen voneinander isolirt sind; sie gleichen sich wieder aus und die Polarität verschwindet, sobald die elektrische Kraft aufhört zu wirken. Diesen Zustand des influirten Nichtleiters nennt man dielektrische Polarisation. Die Folge dieser Polarisation der kleinsten Teilchen ist ein eigentümlicher Spannungszustand, in dem der Nichtleiter sich befindet. Diejenigen Teilchen nämlich, die in Richtung einer elektrischen Kraftlinie hintereinander liegen, wenden nach dem Gesagten entgegengesetzte Ladungen einander zu und ziehen sich infolgedessen an, während senkrecht zu den Kraftlinien gleichartige Ladungen nebeneinander liegen und daher Abstofsung eintritt. Es wird also in den Kraftlinien eine Zugspannung, wie in einem gedehnten Faden, und senkrecht zu ihnen eine Druckwirkung bestehen, wie wir ähnliches uns oben bereits für die magnetischen Wirkungen klar gemacht haben (145). Dafs wirklich derartige Spannungen in einem Isolator, wenn er elektrisirt wird, auftreten, das beweisen einerseits Gestalts- und Volumänderungen, die Isolatoren beim Elektrisiren erfahren (Elektrostriktion), und andererseits der Umstand, dafs durchsichtige Isolatoren, auch Flüssigkeiten, sich in starken elektrischen Feldern, zwischen den Platten eines Kondensators bei kräftiger Ladung, gegen das Licht wie anisotrope Körper verhalten (elektrische Doppelbrechung, Kerr, 1875).

Nach neueren Anschauungen, wie sie zuerst von Faraday ausgesprochen, und später von Maxwell weiter entwickelt worden sind, führt man alle elektrischen Anziehungen und Abstofsungen auf die im dielektrischen Zwischenmedium wirkenden Zug- und Druckkräfte zurück, und denkt sich demgemäfs die elektrischen Wirkungen nicht mehr, wie es früher angenommen wurde, als eine den Raum überspringende Fernwirkung, sondern als einen von Teilchen zu Teilchen fortschreitenden, durch die Wechselwirkung benachbarter Teilchen (Nahewirkungstheorie) übermittelten Vorgang. Dazu bedarf es dann natürlich der Annahme, dafs es in einem elektrischen Felde stets, auch im luftleeren Raume, einen dielektrischer Polarisation fähigen Träger jener Wirkungen gibt. Dafs man in der That befugt ist, demjenigen Medium, das man als Träger des Lichtes ansieht, auch diese Rolle zuzuschreiben, dafür haben andere, später zu besprechende Erscheinungen den Ausschlag gegeben.

186. **Sitz der Ladung in einer Leidener Flasche. Rückstand.** Wie der Deckel des Elektrophors (177) unelektrisch ist, wenn er an isolirendem Griff von dem Harzkuchen abgehoben wird,

so ist auch die Belegung einer Leidener Flasche unelektrisch, wenn sie isolirt von dem Dielektricum entfernt wird. Man kann dies nachweisen mittels einer Flasche mit abnehmbaren Belegen aus Weifsblech. Stellt man die geladene Flasche auf eine isolirende Unterlage, hebt mittels eines Glashakens die innere Belegung heraus, sodann das Glasgefäfs aus der äufseren Belegung, so zeigen sich die beiden Belege nur ganz schwach elektrisch; fafst man aber das Glasgefäfs aufsen mit der einen Hand und berührt es innen mit der anderen Hand, so hört man ein Knistern und erhält einen schwachen Schlag. Setzt man, nachdem man die Belege durch Berührung unelektrisch gemacht, die Flasche wieder zusammen, so erweist sie sich wieder geladen und gibt einen Funken. Bei diesen Versuchen bleibt also die elektrische Ladung beim Auseinandernehmen der Flaschen an der Oberfläche des Dielektricums haften.

Übrigens ist das Isolationsvermögen der Dielektrica im allgemeinen kein vollkommenes. Vielmehr vollzieht sich durch das Dielektricum hindurch ein allmählicher Ausgleich der elektrischen Ladungen der Belege, der allerdings bei guten Isolatoren ganz aufserordentlich langsam vor sich geht. Man bezeichnet diese Eigenschaft der Dielektrica, den Ausgleich der Ladungen zu vermitteln, als ihr elektrisches Leitungsvermögen. Dasselbe ist für die Isolatoren aber gering; man sagt, sie setzen dem Durchgange der Elektricität einen sehr hohen Widerstand entgegen.

Die festen Dielektrica zeigen aufserdem die Eigentümlichkeit der sogenannten Rückstandsbildung. Entladet man eine Leidener Flasche durch vollständige Schliefsung mit dem Auslader, so zeigt sie sich nach einiger Zeit wieder schwach geladen, in dem Sinne, in dem sie ursprünglich geladen war. Diese gewissermafsen zurückgebliebene Ladung nennt man das Residuum oder den Rückstand. Gasförmige und flüssige Isolatoren zeigen keinen Rückstand. Wenn man dagegen das isolirende Mittel aus übereinander geschichteten, isolirenden Flüssigkeiten zusammensetzt, so zeigt ein solcher Isolator ebenfalls Rückstandsbildung. Maxwell hat die Ansicht ausgesprochen, dafs auch die Rückstandsbildung in den festen Isolatoren aus einem unhomogenen Gefüge dieser Isolatoren zu erklären sei, indem die schwache Leitfähigkeit der Isolatoren Veranlassung gibt, dafs sich bei länger andauernder Ladung im Innern des Isolators an den Grenzflächen seiner verschiedenen Bestandteile elektrische Ladungen ansammeln, die nach der Entladung allmählich wieder rückwärts wandern.

187. **Die Influenzmaschine** (1864 fast gleichzeitig erfunden von Töpler und von Holtz) ist eine durch Influenz wirkende weit ergiebigere Elektricitätsquelle als die gewöhnliche Elektrisirmaschine. Die Holtzsche Influenzmaschine (Fig. 156) besteht aus zwei gefirnisten Glasscheiben, von denen die kleinere ($B$) mittels Kurbel- und Schnurlauf ($S$) um ihre aus Hartkautschuk verfertigte wagrechte Achse ($x$) gedreht werden kann, deren Zapfenlager in zwei von vier Glassäulen

1, 2, 3, 4 getragenen Querbalken aus Hartkautschuk (*k k* und *h h*) angebracht sind; die gröfsere feststehende Scheibe (*A*), welche, von gläsernen Querstäben gehalten, sehr nahe hinter der drehbaren Scheibe steht, ist an zwei gegenüberliegenden Stellen mit Ausschnitten (*a* und *b*) versehen, an deren Rändern Papierbelege (Armaturen, *c* und *d*) angebracht sind, von welchen Papierspitzen in die freien Räume der Ausschnitte hineinragen. Vor der drehbaren Scheibe befinden sich, den Papierbelegen der hinteren Scheibe gerade gegenüber, zwei messingene Kämme oder Rechen (*g g* und *i i*), welche ihre Spitzen der Scheibe zukehren, und deren messingene Stiele, durch den Querbalken *k k* hindurchgesteckt, in den Kugeln *f* und *e* endigen. Durch diese Kugeln gehen dicke Messingdrähte, welche nach aufsen mit isolirenden Handgriffen aus Hartkautschuk, nach innen mit Knöpfen

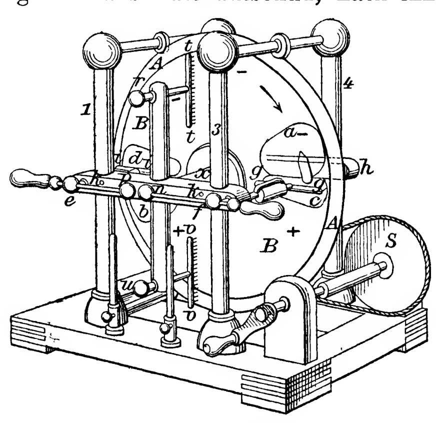



Fig. 156.
Influenzmaschine.

(*n* und *p*) versehen sind, verschiebbar hindurch. Hält man hinter den Papierbeleg *c* eine geriebene Hartkautschukplatte (*H*, Fig. 157), und dreht die Scheibe (*B*) in der Richtung des Pfeiles den Papierspitzen entgegen, während die Knöpfe *n* und *p* miteinander in Berührung sind, so wird zunächst der Papierbeleg *c* negativ elektrisch, indem seine positive Elektricität durch die Papierspitze gegen die Kautschukplatte ausströmt, während die negative zurückbleibt; sobald dies erreicht ist, wird die Kautschukplatte entfernt. Die negative Elektricität des Beleges *c* wirkt nun durch Influenz sowohl auf die sich drehende Glasscheibe als auch auf den Messingkamm *g g*, indem sie in beiden die positive Elektricität anzieht, die negative zurücktreibt; jene wird dadurch auf ihrer inneren Seite positiv, auf der äufseren zunächst negativ; da aber in dem die Elektricität leitenden Messing die Influenz viel rascher und vollkommener erfolgt als in dem nichtleitenden Glas, so reicht die aus den Spitzen des Kammes gegen die Scheibe strömende positive Elektricität nicht nur hin, die negative Elektricität an der Aufsenseite auszugleichen, sondern auch noch, letztere

mit positiver Elektricität zu beladen. Der Teil der Scheibe, welcher an dem Kamme *gg* vorübergegangen ist (in der Fig. 156 ihre untere Hälfte), ist daher auf beiden Seiten positiv elektrisch. Diese positive Elektricität, an der in den Ausschnitt *b* hineinragenden Papierspitze angekommen, zieht aus dieser negative Elektricität heraus, hebt sich gegen dieselbe auf und läſst den Papierbeleg *d* positiv elektrisch zurück; der Erfolg ist derselbe, als wäre die positive Elektricität der unteren Scheibenhälfte in diesen Beleg übergegangen. Indem nun die positive Elektricität des Beleges *d* auf die drehbare Scheibe und den Messingkamm *ii* ganz wie vorhin Influenz übt und negative Elektricität aus den Spitzen auf die Scheibe zu strömen nötigt, wird deren obere Hälfte mit negativer Elektricität geladen, welche, an dem Ausschnitt *a* angelangt, in den Papierbeleg *c* übergeht und dessen negative Ladung und influirende Wirkung vermehrt. Da sich

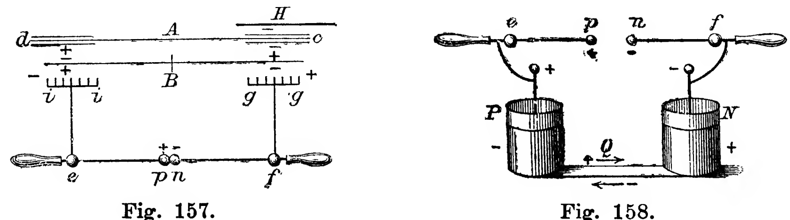



Fig. 157. Fig. 158.

Zur Influenzmaschine.

dieses Spiel bei jeder Umdrehung wiederholt, so wird die Ladung beider Belege rasch bis zu einer gewissen Grenze gesteigert. Von den durch die Influenzwirkung der Belege in die Kämme zurückgetriebenen Elektricitäten geht die positive vom Kamm *ii* nach der Kugel *p*, die negative vom Kamme *gg* geht nach der Kugel *n*; zwischen diesen beiden Kugeln, welche man Elektroden nennt, gleichen sie sich aus. Damit dies bei der anfangs schwachen Ladung möglich sei, müssen die Kugeln beim Ingangsetzen der Maschine miteinander in Berührung sein. Sobald aber eine genügende Ladung erreicht ist, was sich durch ein zischendes Geräusch verrät, geht zwischen den auseinander gerückten Kugeln ein prasselnder Funkenstrom über, welcher andauert, so lange man die Scheibe dreht. Leitet man die eine Kugel zur Erde ab, so kann man aus der anderen Funken ziehen wie aus dem Konduktor einer gewöhnlichen Elektrisirmaschine. Eine Leidener Flasche oder Batterie, deren Belegungen man mit den geöffneten Elektroden in Verbindung setzt, wird in wenigen Sekunden geladen. Um statt des andauernden Funkenstromes einzelne stärkere Funken zu erhalten, kann man jede Elektrode mit dem Knopf einer Leidener Flasche und die äuſseren Belegungen der beiden Flaschen durch einen Stanniolstreifen unter sich verbinden (Fig. 158). Jede Flasche lädt sich innen mit der Elektricität der zugehörigen Elektrode, während die auf dem äuſseren Beleg abgestoſsene gleichnamige Elektricität durch den

Stanniolstreifen nach dem äufseren Beleg der anderen Flasche wandert und sich dort ansammelt; ist nach kurzer Zeit auf den mit den inneren Belegungen verbundenen Elektroden die zum Durchschlagen der dazwischen liegenden Luftstrecke erforderliche Dichte erreicht, so springt zwischen ihnen mit lautem Knall ein Funke über, während gleichzeitig die Elektricitäten der äufseren Belege durch den Stanniolstreifen sich ausgleichen. Diese Ausgleichung wird sichtbar, wenn man die Verbindung der äufseren Belegungen statt durch einen ununterbrochenen Leiter durch Eisenfeilspäne herstellt, die man zwischen den beiden Flaschen auf ihre isolirende Unterlage streut; so oft die Entladung der Flaschen durch den Funken zwischen den Elektroden erfolgt, fährt ein Strang von Blitzen durch die Eisenfeile von einer Flasche zu anderen. Die beiden Flaschen sind, wie man sieht, in Kaskade verbunden.

Entfernt man die beiden Elektroden so weit voneinander, dafs die auf ihnen angesammelten Elektricitäten sich durch die Luftstrecke nicht mehr ausgleichen können, so fliefsen sie durch die Kämme auf die Scheibe zurück und vernichten deren Ladung oder kehren sie sogar um. Um das Erlöschen der Maschine bei zu grofser Entfernung der Elektroden zu verhüten, sind die überzähligen Kämme *tt* und *vv* (Fig. 156) angebracht, welche beziehungsweise mit *gg* und *ii* leitend verbunden, die zurückgestauten Elektricitäten aufnehmen und gegen die Scheibe strömen lassen.

Das Ausströmen der Elektricitäten aus den Spitzen der Kämme, von welchem das zischende Geräusch herrührt, ist im Dunkeln sichtbar; die positive Elektricität erscheint in Form von grabenartigen Lichtbüscheln an den Spitzen des Kammes *gg* und der Spitze des zugehörigen Belegs, welche sich auf der Scheibe, der Drehungsrichtung entgegen, ausbreiten, die negative in Form von Lichtpünktchen an den Spitzen des Kammes *ii* und der entsprechenden Papierspitze.

Die selbsterregenden Influenzmaschinen nach dem Muster von Töpler (Vofs, Wimshurst) haben den Vorteil, dafs die zum Angehen erforderliche geringe Elektricitätsmenge nicht von aufsen zugeführt werden mufs, sondern von der Maschine selbst erzeugt wird. Die drehbare Scheibe trägt nämlich auf ihrer Vorderseite eine Anzahl metallischer Wulste, welche beim Drehen an zwei Pinseln von Rauschgold, die mit den Papierbelegen der festen Scheibe leitend verbunden sind, reibend vorüberstreifen. Die feste Scheibe hat keine Ausschnitte.

Dreht man eine Influenzmaschine, während sie geladen ist, so fühlt man einen gröfseren Widerstand, als wenn sie nicht geladen ist; was man im ersteren Falle an Arbeit mehr zu leisten hat, wird in elektrische Energie verwandelt. Verbindet man die Elektroden einer thätigen Influenzmaschine mit den Kämmen einer zweiten, von welcher der Schnurlauf abgenommen ist, so gerät die drehbare Scheibe der letzteren in rasche Umdrehung. Während die erste Maschine

Arbeit in elektrische Energie verwandelt, wird in der zweiten elektrische Energie in mechanische Arbeit umgesetzt.

Bei der Wasserinfluenzmaschine (W. Thomson) kommt dasselbe Princip der Steigerung der Spannung in sinnreicher Weise zur Anwendung. Aus einem mit der Erde verbundenen gegabelten Rohr (Fig. 159) fliefsen zwei Wasserstrahlen durch metallene Hohlcylinder *A* und *B*, so dafs die Stellen, wo die Wasserstrahlen in Tropfen zerreifsen, innerhalb der Cylinder liegen. Die Tropfen aus *A* fallen in einen innen mit einem Trichter versehenen Metallcylinder

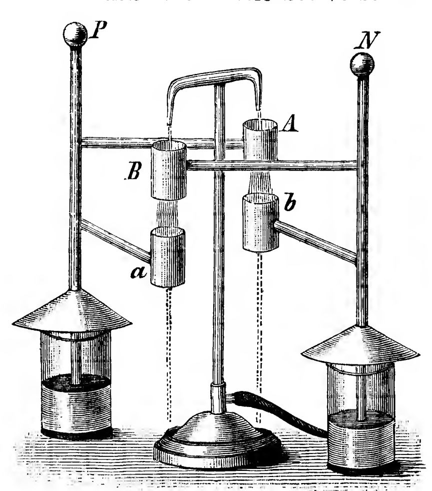



Fig. 159.
Wasserinfluenzmaschine.

*b* und die Tropfen aus *B* in den ebenso beschaffenen Cylinder *a*. *A* und *a* sind mit der Elektrode *P*, *B* und *b* mit der Elektrode *N* leitend verbunden. Elektrisirt man den Cylinder *B* schwach negativ, so werden die durch ihn fallenden Wassertropfen durch Influenz positiv elektrisch, geben ihre positive Elektricität an *a*, *A* und *P* ab, und fliefsen unelektrisch ab. Die positive Elektricität von *A* macht die durchtretenden Tropfen negativ, diese geben ihre negative Elektricität an *b*, *B* und *N* ab, wodurch die negative Ladung von *B* gesteigert wird u. s. f., so dafs endlich die Konduktoren *P* und *N* zu weit höherer Spannung geladen werden, als die ursprünglich mitgeteilte war, und Funken zwischen den Elektroden überspringen.

188. **Messung der elektrischen Kraft, der Elektricitätsmenge, des Potentials und der Kapacität. Elektrometer.** Man mifst eine elektrische Kraft, indem man ihr durch eine bekannte Kraft das Gleichgewicht hält. Hierzu dienliche Apparate nennt man Elektrometer. Zu ihnen gehört die bereits früher beschriebene Coulombsche Drehwage, in welcher der elektrischen Kraft die Torsionselasticität eines Drahtes entgegenwirkt. Beim Goldblattelektroskop

und dem Henley'schen Quadrantenelektroskop (182) ist es das Gewicht, das der Abstoſsung entgegenwirkt.

Eine neuere, zur Messung höherer Spannungen geeignete Form des Quadrantenelektroskops ist das Braun'sche Elektrometer (Fig. 160). In ein rundes Metallgehäuse, das zur Erde abgeleitet wird, führt isolirt ein Messingstab *ab*, der bei *b* eine zwischen Spitzen leicht bewegliche Aluminiumnadel *ef* trägt. Ihre horizontale Drehungsachse

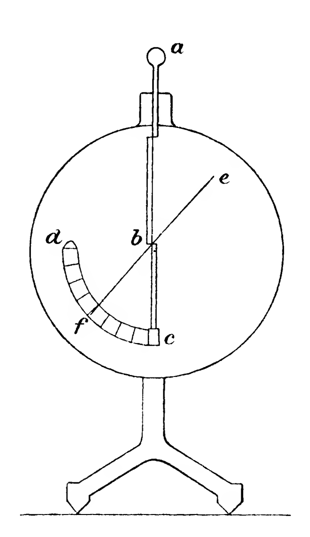
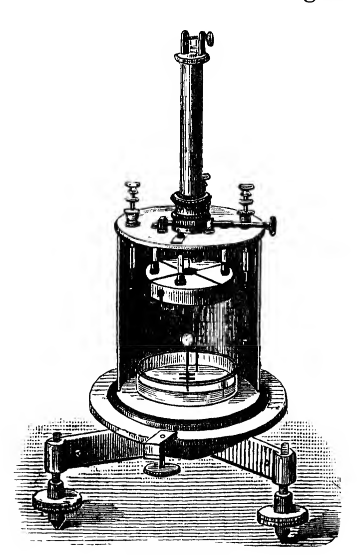


Fig. 160.
Braunsches Elektrometer.


Fig. 161.
Quadrantenelektrometer.

liegt ein wenig über ihrem Schwerpunkt, so daſs sich die Nadel in der Ruhelage senkrecht einstellt und sich dabei an den Messingstab *ab* von der einen und seine Fortsetzung *bc* von der anderen Seite anlegt. Wird Elektricität dem ganzen Systeme zugeführt, so wird die Nadel von den festen Messingstäben abgestoſsen und man liest die Gröſse der Spannung an der Stellung der Nadelspitze auf dem Quadranten *cd* ab.

Auch das Goldblatt- oder noch besser Aluminiumblattelektroskop ist von Exner durch sorgfältige Ausführung und Anbringung einer Skala zur Ablesung des Ausschlages der Blättchen zu einem Meſsinstrument für mittlere Spannungen gemacht worden.

Kleine Spannungen miſst man am genauesten mit dem Quadrantenelektrometer von Lord Kelvin (Sir William Thomson, 1867). Es enthält eine aus dünnem Aluminiumblech geschnittene Nadel von Biskuitform, die innerhalb einer flachen cylindrischen Metallbüchse schwebt, welche durch zwei zu einander senkrechte durch die Achse gehende Schnitte in vier Quadranten geteilt ist (in Fig. 162 von oben gesehen). Je zwei diametral gegenüberstehende Quadranten

sind miteinander leitend verbunden. Die Nadel ist an zwei Coconfäden bifilar aufgehängt (32), welche im Ruhezustand zu einander parallel sind, und, aus dieser Lage gebracht, vermöge der Schwerkraft in dieselbe zurückzukehren streben. Die Quadranten sind zum Schutz gegen äufsere elektrische Einflüsse von einem Metallgehäuse umgeben (s. Schirmwirkung, 174), dessen Deckel das Glasrohr trägt, welches die Fäden einschliefst, und drei isolirte Zuleitungen beziehungsweise zu den Quadrantenpaaren und zur Nadel durchläfst. Letztere Zuleitung führt zunächst durch einen Platindraht in ein im unteren Teil des Gehäuses aufgestelltes Glasgefäfs mit Schwefelsäure, in welche andererseits ein Platindraht taucht, der die Verlängerung der Nadelachse bildet und zur Dämpfung der Schwingungen zwei kleine Querstäbchen trägt. An dieser Verlängerung ist ein kleiner Spiegel angebracht, der, durch ein Fenster des Gehäuses sichtbar, mittels Fernrohr und Skala (Spiegelablesung, 143) die Stellung der Nadel zu beobachten gestattet. Beim Gebrauch wird die Nadel (das Aluminiumblech) bis zu einer bestimmten ziemlich hohen Spannung geladen, etwa durch Verbindung mit dem inneren Beleg einer Leidener Flasche, ein Quadrantenpaar mit der zu messenden Elektricitätsquelle, das andere mit der Erde verbunden, oder man bringt die Quadrantenpaare auf entgegengesetzt gleiche Spannungen und verbindet die Nadel mit dem zu untersuchenden Körper. Für kleine Ablenkungen ist in beiden Fällen die elektrische Kraft dem Ablenkungswinkel oder der Zahl der abgelesenen Skalenteile proportional.

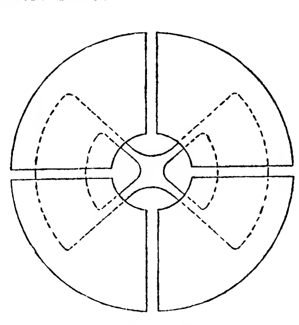


Fig. 162.
Zum Quadrantenelektrometer.

Diese Instrumente dienen dazu, die elektrischen Kräfte untereinander zu vergleichen, und demnach auch die entsprechenden Elektricitätsmengen und die Potentiale, da diese Gröfsen, falls die Kapacität ungeändert bleibt, einander proportional sind.

Das Wage-Elektrometer von W. Thomson (1867) dagegen mifst in absolutem Mafse, nämlich durch Gewichte, die Anziehung zwischen zwei parallelen Platten, deren eine mit der zu messenden Elektricitätsquelle verbunden ist, während die andere, die horizontal an einem Ende eines Wagbalkens hängt, mit der Erde verbunden ist oder auf einem bestimmten konstanten Potential gehalten wird. Da die elektrische Dichte auf einer kreisrunden Scheibe von der Mitte nach aufsen hin anfangs sehr langsam, in der Nähe des Randes aber sehr rasch zunimmt, so läfst man die am Wagbalken hängende Scheibe innerhalb eines mit ihr leitend verbundenen horizontalen Ringes (Schutzring) schweben; so bildet sie nur den mittleren Teil einer gröfseren Platte, auf welchem die Verteilung der Elektricität als gleichförmig angesehen werden kann. Die andere Platte wird

ihr nun von unten her bis auf einen zu messenden Abstand soweit genähert, dafs die elektrische Anziehung zwischen den beiden Platten der Schwerkraft, welche die aufgehängte Scheibe aus dem Schutzring herauszuheben strebt, das Gleichgewicht hält.

Um die Kapacitäten $C$ und $C'$ zweier Leiter und Kondensatoren zu vergleichen, kann man durch ein Elektrometer das Potential messen, welches der erste durch Ladung mit irgend einer Elektricitätsmenge erhält, und mit dem Potential $V'$ vergleichen, welches die beiden Leiter miteinander verbunden annehmen. Es ist alsdann

$$C\,V = (C + C')\,V' \quad \text{oder} \quad \frac{C'}{C} = \frac{V - V'}{V'}.$$

189. **Entladungserscheinungen.** Die Entladung einer Flasche (oder Batterie), d. h. die Vereinigung der beiden entgegengesetzten auf den Belegungen angesammelten Elektricitäten, erfolgt, wenn man zwischen der äufseren Belegung und dem zur inneren Belegung führenden Knopf eine leitende Verbindung herstellt, oder beide Belege zur Erde ableitet. Fafst man mit der einen Hand die äufsere Belegung, mit der anderen den Knopf an, so fühlt man eine starke Erschütterung der Armgelenke, bei stärkerer Ladung einen heftigen Schmerz in der Brust. Dieser elektrische Schlag kann durch eine ganze Kette von Personen, die sich an den Händen fassen, geleitet werden.

Um bei Versuchen mit Leidener Flaschen die Entladung durch den menschlichen Körper zu vermeiden, bedient man sich eines isolirten Ausladers, z. B. zweier durch ein Scharnir verbundener, an

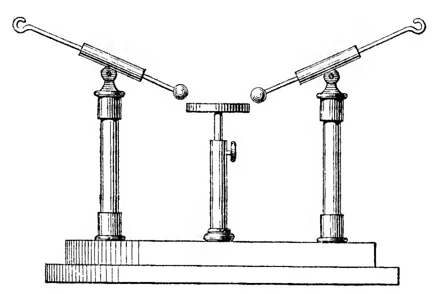


Fig. 163.
Allgemeiner Auslader.

den Enden mit Knöpfen versehener Drähte mit gläsernem Handgriff, deren einer mit der äufseren Belegung in Berührung gebracht, der andere dem Knopf der Flasche rasch genähert wird. Will man den Entladungsschlag bequem auf beliebige Gegenstände wirken lassen, so benützt man Henleys (1770) allgemeinen Auslader (Fig. 163). Auf zwei Glasfüfsen sind, an Scharniren drehbar, zwei kurze Röhren angebracht, in welchen einwärts mit Knöpfen, nach auswärts mit Haken versehene Metallstäbchen sich verschieben lassen, deren eines man mit der äufseren Belegung, und deren anderes man mit Hilfe

eines gewöhnlichen Ausladers mit dem Knopf der inneren Belegung in Verbindung setzt. Zwischen den beiden Stäbchen befindet sich, ebenfalls auf Glasfuſs, ein verstellbares Tischchen.

Verglichen mit dem schwachen Funken, den man aus dem Konduktor einer Elektrisirmaschine zieht, ist der Entladungsfunke einer Leidener Flasche glänzend und knallend, um so heller und lauter, je gröſser die Elektricitätsmenge ist, die in ihm zum Ausgleich kommt, je gröſser also die Flasche oder Batterie ist und je stärker sie geladen ist. Das Licht dieses Funkens rührt nicht bloſs von der durch den Funken durchbrochenen und erhitzten Luft, sondern auch von Dämpfen der Metalle her, zwischen denen der Funke überspringt. Die starke Erhitzung der Luft durch den Funken weist man nach, indem man ihn in einem abgeschlossenen, mit einem Manometer verbundenen Luftraum überspringen läſst; das Manometer zeigt durch plötzlichen Anstieg die Erwärmung der Luft an. (Kinnersley's Luftthermometer.) Oder man leitet den Funken durch den Hohlraum des elektrischen Mörsers; dann wird die kleine Kugel, die ihn verschlieſst, emporgeschleudert. Auch flüssige und feste Isolatoren können von einer elektrischen Entladung durchbrochen werden. Bei groſsen Elektricitätsmengen treten dabei infolge der Hitze und des dadurch erzeugten Druckes explosionsartige Wirkungen auf. Geht der Entladungsschlag einer gröſseren Batterie unter Wasser in einem Trinkglas über, so zertrümmert er das Glas. Schlägt er durch Papier, Kartenblätter, Pappe, so ensteht ein Loch, das nach beiden Seiten aufgeworfene Ränder zeigt. Zwischen Spitzen, durch die man die Knöpfe des Ausladers ersetzt, werden auch Holz- und Glasscheiben durchbohrt, letztere besonders leicht, wenn man die Ausbreitung der Elektricität auf der Oberfläche des Glases von der Spitze aus durch aufgetropftes Stearin oder Paraffin verhindert.

Läſst man den Funken auf die Oberfläche von Alkohol oder Äther schlagen, so werden diese Flüssigkeiten entzündet. Will man aber Schieſspulver entzünden, so muſs man die Entladung durch Einschaltung eines schlechten Leiters, nämlich einer feuchten Hanfschnur, verlangsamen, da bei durchaus metallischer Verbindung die Entladung so heftig erfolgt, daſs das Pulver auseinander geworfen wird, ehe es sich entzündet hat.

Auch in den metallischen Teilen der Leitung erzeugt die Entladung Wärme. Leitet man den Entladungsschlag einer Batterie durch dünne Metalldrähte, die man zwischen die Knöpfe des Ausladers bringt, so werden sie durchschmolzen oder vollständig verdampft, dickere Drähte werden nur erwärmt. Rieſs hat diese Wärmeentwicklung durch sein Elektrothermometer gemessen (1838), ein Luftthermometer, durch dessen Kugel ein feiner spiralförmig gewundener Platindraht gezogen ist, durch welchen die Entladung geleitet wird. Die im Draht erzeugte Wärme teilt sich der umgebenden Luft mit; diese dehnt sich aus und drückt die Flüssigkeit in der auf verstellbarer geneigter Ebene liegenden Thermometerröhre um so

weiter herab, je höher der Draht sich erwärmt hat. Es ergab sich, dafs die entwickelte Wärmemenge dem Quadrate der entladenen Elektricitätsmenge direkt und der Kapacität der Flasche umgekehrt proportional ist.

Diese Wärmemenge ist nämlich gleich der Energie der elektrischen Ladung $W = \frac{1}{2} \frac{E^2}{C}$ (170). Die bei der Ladung der Batterie (zum Drehen der Maschine) aufgewendete Arbeit ist als potentielle Energie in der geladenen Batterie aufgespeichert. Sie setzt sich bei der Entladung wieder in kinetische Energie, in Schall und Wärme, um.

190. **Dauer des elektrischen Funkens.** Eine rasch sich drehende Scheibe mit gemalten Speichen oder Sektoren (Farbenkreisel), im dunklen Zimmer durch den Entladungsfunken einer Leidener Flasche beleuchtet, scheint stillzustehen, weil die Dauer des Funkens so kurz ist, dafs er die Scheibe nur in einer einzigen Stellung sichtbar macht.

Dafs der Funken gleichwohl eine mefsbare Dauer hat, ergibt sich, wenn man ihn in einem schnell rotirenden Spiegel betrachtet. Man sieht den Funken dann zu einem Lichtband auseinander gezogen und kann aus der Länge dieses Bandes und der Umdrehungsgeschwindigkeit des Spiegels die Dauer des Funkens berechnen. Derartige Versuche zeigen, dafs die Dauer des Funkens abhängig ist von der Beschaffenheit des Schliefsungsbogens, der die Funkenstrecke mit den Belegungen der Batterie verbindet, von der Flaschenzahl und von der Länge des Funken. Im allgemeinen handelt es sich dabei um Zeitdauern von einigen Milliontel bis etwa 40 Milliontel Sekunden.

191. **Büschel- und Glimmentladung. Lichtenbergische Figuren.** Positive und negative Elektricität zeigen verschiedenes Verhalten bei der Entladung. Strömt z. B. die Elektricität aus einer Spitze aus, so bildet die positive Elektricität ein pinselförmiges Lichtbüschel, die negative ein Lichtpünktchen, welche wegen ihrer Lichtschwäche nur im Dunkeln zu sehen und von einem leise zischenden Geräusche begleitet sind. Die gleichen Erscheinungen treten auf, wenn man die Konduktoren einer Influenzmaschine so weit auseinander zieht, dafs ein vollständiger Ausgleich der Elektricität in Form von Funken nicht mehr zu Stande kommt. Auf dieser verschiedenen Art der Ausbreitung der Elektricität durch die Luft hindurch, beruht es, dafs, wenn die Knöpfe eines Ausladers sich nicht direkt gegenüber stehen, ein dazwischen gehaltenes Kartenblatt stets am negativen Pole durchbohrt wird (Lullin'scher Versuch).

Ähnliche Unterschiede der beiden Elektricitäten zeigen sich, wenn man sie der Oberfläche einer nichtleitenden Platte, z. B. von Harz oder Hartgummi, zuführt, indem man etwa eine auf diese Oberfläche aufgesetzte Spitze mit dem Knopf einer geladenen Leidener

Flasche berührt. Die dadurch hervorgerufene Elektrisirung der Oberfläche macht man sichtbar, indem man auf die Platte aus einem mit leinenem Läppchen zugebundenen Gefäſs ein aus Mennige und Schwefelblumen oder Bärlappsamen gemischtes Pulver (elektroskopisches Pulver) siebt. Die roten Mennigeteilchen, durch Reibung an den Maschen der Leinwand positiv elektrisch geworden, setzen sich an den negativ elektrischen Stellen der Platte fest, die negativ elektrischen gelben Schwefelteilchen oder Bärlappsamen haften an den positiven Stellen. War die zugeleitete Elektricität positiv, so bildet die so entstehende Figur einen gelben Stern mit verästelten Strahlen, welche von der berührten Stelle nach allen Seiten hin sich ausbreiten; bei negativer Elektricität dagegen entsteht nur ein rundlicher roter Fleck. (Lichtenberg's elektrische Staubfiguren, 1777).

Läſst man die elektrische Entladung nicht durch Luft von atmosphärischer Dichtigkeit, sondern durch verdünnte Luft hindurchgehen, z. B. im sogenannten elektrischen Ei (Fig. 164), einem mit Messingfassungen versehenen und mit einem Hahn verschlieſsbaren eiförmigen Glasgefäſs, in welches mit Kugeln endigende Messingstäbe (*b* und *b'*) hineinragen, so nimmt mit wachsender Luftverdünnung die zum Eintritt der Entladung erforderliche Spannungsdifferenz ab und zugleich treten sehr charakteristische Änderungen der Lichterscheinungen ein. Der schmale glänzende Entladungsfunken geht in eine breite, violett rötliche Lichtgarbe über, welche sich von der positiven Kugel fast bis zur negativen Kugel hin erstreckt; diese dagegen erscheint von einer blauen Lichthülle umgeben, dem negativen Glimmlicht, welche von der positiven Lichtgarbe durch einen dunklen Zwischenraum getrennt ist.

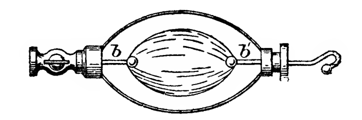


Fig. 164.
Elektrisches Ei.

192. **Elektrischer Geruch.** In der Nähe einer thätigen Elektrisir- oder Influenzmaschine nimmt man häufig einen auffallenden, demjenigen des Phosphors ähnlichen Geruch wahr. Durch die aus Spitzen ausströmende Elektricität wird nämlich der gewöhnliche geruchlose Sauerstoff ($O_2$) der Luft in eine eigentümlich riechende Abänderung umgewandelt, welche Ozon oder aktiver Sauerstoff ($O_3$) genannt wird. Der letztere Name soll andeuten, daſs sich der so abgeänderte Sauerstoff vor dem gewöhnlichen durch stärkere chemische Wirkung auszeichnet. Man kann die Gegenwart des Ozons nachweisen durch Papierstreifen, welche mit Stärkekleister und Jodkaliumlösung befeuchtet sind. Das durch den aktiven Sauerstoff aus dem Jodkalium verdrängte Jod färbt den Kleister blau.

193. **Luftelektricität.** Eine elektrische Entladung gröſster Art ist der Blitz, ein groſser elektrischer Funke, der zwischen zwei Wolken oder zwischen einer Gewitterwolke und der Erde überspringt. Franklin war der erste, welcher die elektrische Natur des Blitzes (1752) nachwies. Er lieſs einen mit Spitzen versehenen Papierdrachen unter einer Gewitterwolke steigen, und vermochte, nach-

dem die Schnur vom Regen durchnäfst und dadurch leitend geworden war, aus einem unten darangehängten Schlüsselbund Funken zu ziehen, welche sich von denjenigen einer Elektrisirmaschine in nichts unterschieden. Die Dauer eines Blitzes ist bei neueren photographischen Aufnahmen von Blitzen sehr verschieden gefunden worden. Es kommen Blitze vor, deren Dauer nicht mehr als $^1/_{100000}$ Sekunde beträgt, aber auch welche von der Dauer ganzer Sekunden. Ihrem Aussehen nach unterscheidet man drei Arten von Blitzen. Die Zickzackblitze erscheinen als sehr schmale Lichtlinien, welche in geschlängelter, jedoch niemals scharfwinklig geknickter Bahn, wie man auf Bildern häufig dargestellt sieht, von Wolke zu Wolke oder aus den Wolken zur Erde fahren; sie teilen sich oft gabelförmig in mehrere Äste und gleichen auch hierin den Funken, welche man aus dem Konduktor einer Elektrisirmaschine zieht. Die Flächenblitze verbreiten ihr viel weniger helles und meist rötlich gefärbtes Licht über gröfsere Flächen der Gewitterwolken; sie sind wahrscheinlich nur der Widerschein von Zickzackblitzen, die durch eine Wolke verdeckt sind. Weit seltener und von rätselhafter Entstehungsweise sind die Kugelblitze, welche gleich Feuerkugeln von den Wolken auf die Erde stürzen und sich dabei so langsam bewegen, dafs man ihrem Laufe mit dem Auge folgen und ihre Geschwindigkeit schätzen kann. Manchmal verschwinden sie plötzlich und geräuschlos, oft aber zerplatzen sie mit lautem Knall, indem sie nach allen Seiten Zickzackblitze schiefsen, welche grofse Verheerungen anrichten.

Wie der Funke einer Elektrisirmaschine von einem Knall, so ist der Blitz vom Donner begleitet. Da das Licht fast augenblicklich, der Schall aber vergleichsweise langsam sich fortpflanzt, so wird der Donner immer erst einige Zeit nach dem Erscheinen des Blitzes gehört. Aus der Zeit zwischen der Wahrnehmung des Blitzes und des Donners kann man leicht, da der Schall 340 m in der Sekunde durchläuft, die Entfernung des Blitzes von dem Standpunkte des Beobachters berechnen. Obgleich der Schall an allen Punkten der Blitzbahn gleichzeitig entsteht und wie der Funke selbst nur äufserst kurze Zeit dauert, so vernehmen wir doch infolge der langsamen Fortpflanzung des Schalles den Donner als ein manchmal 45 Sekunden lang fortgesetztes Rollen. Die Blitze erreichen nämlich häufig eine Länge von 10—15 km. Nehmen wir an, dafs die Entfernungen ihrer verschiedenen Punkte von unserem Standpunkte nur um 1000 m voneinander verschieden sind, so wird der am entferntesten Punkte der Blitzbahn entstandene Schall erst drei Sekunden später zu uns gelangen, als derjenige, welcher an dem uns nächsten Punkte entstand. Während dieses Zeitraumes ist die Schallempfindung keine gleichmäfsige; gewöhnlich beginnt der Donner mit leisem Rollen, dann folgt heftiges Krachen und Knallen, bis er endlich dumpf grollend verstummt. Von allen Strecken nämlich der geschlängelten Blitzbahn, welche auf uns zu oder von uns weg gerichtet sind, gelangt der Schall nur nach und nach und von jedem Punkte besonders zu uns; er erreicht uns aber mit einem Schlage von allen Punkten derjenigen Strecken, welche quer verlaufen, ohne ihre Entfernung zu ändern. Ein Blitz, dessen sämtliche Punkte gleich weit von unserem Ohre entfernt wären, der z. B. einen um unser Ohr beschriebenen Kreis durchliefe, würde nur als ein einziger augenblicklicher Knall vernommen werden; jede plötzliche Biegung der Blitzbahn aber hat eine ebenso plötzliche Änderung in der Stärke des wahrgenommenen Schalles und eine zeitliche Verschiebung seiner Wahrnehmung zur Folge. Zu dieser Ursache des Donnerrollens kommt noch eine zweite hinzu, nämlich der Widerhall an Berghalden und Felswänden, sowie an den Wolken selbst.

Wie in der Luft, so bringt der Blitz auch in anderen Körpern, durch die er hindurchgeht, die gleichen Wirkungen in entsprechend verstärktem Mafse hervor, die wir bei den Entladungen kennen gelernt haben. Metallstücke werden erhitzt, unter Umständen bis zum Schmelzen oder Verflüchtigen. Schlechte Leiter werden durchbohrt und zertrümmert. Auf den Gipfeln der Berge findet man die Kanten der Felszacken häufig oberflächlich geschmolzen und verglast. Schlägt der Blitz in einen sandigen Boden, so bildet er verästelte, innen verglaste Röhren von geschmolzenen und zusammengesinterten Sandkörnern, welche man Blitzröhren oder Fulguriten nennt. Dieselben erreichen eine Länge

von 4—10 m und sind einige Millimeter bis 5 cm weit und zwar nach unten hin enger und spitz zulaufend. Brennbare Körper werden durch den Blitz entflammt, Flüssigkeiten verdampft. Bäume, vermöge des unter ihrer Rinde vorhandenen Saftes ziemlich gute Leiter, werden häufig vom Blitze getroffen, besonders solche, welche tiefgehende Pfahlwurzeln in die feuchten Schichten des Bodens aussenden, wie Pappel, Eiche, Kiefer. Er durchbricht die Rinde, schält sie in Streifen ab, spaltet und zerschmettert den Holzkörper in dünne Splitter. An diesen Zerstörungen hat ohne Zweifel der Wasserdampf, der sich aus dem Safte des Baumes plötzlich entwickelt, nicht geringen Anteil. Menschen und Tiere werden betäubt oder sogar getötet, wenn sie vom Blitze getroffen werden.

Der Blitz wählt im allgemeinen diejenige Bahn, auf der die Elektricität am besten fortgeleitet wird; er bevorzugt daher die Metalle. Doch ist die gute Leitungsfähigkeit nicht allein bestimmend für den Weg des Blitzes. Hat eine metallische Leitungsbahn Ecken oder auch nur scharfe Krümmungen, so kann es vorkommen, dafs der Blitz an solchen Stellen, statt dem Metall zu folgen, von ihm abspringt.

Auf dem Gedanken, dem Blitz eine metallische Bahn zum unschädlichen Übergang in den Erdboden zu bieten, beruht der Blitzableiter (Franklin 1753). Er besteht aus der Auffangevorrichtung, einer oder mehreren aufrechten, zugespitzten Metallstangen, die auf den höchsten Punkten des zu schützenden Gebäudes angebracht sind, aus den Gebäudeleitungen, die von den Auffangestangen aus auf den zulässig kürzesten Wegen unter möglichster Vermeidung scharfer Krümmungen über das Dach und längs der Mauern zu Boden führen, und aus den Erdleitungen, die dem Blitz eine weitere Leitung in die Erde hinein bis zu gut leitenden feuchten Schichten darbieten sollen. Die Gebäudeleitung besteht entweder aus Stabeisen oder aus Seilen von Kupferdraht oder verzinktem Eisendraht und darf nicht zu dünn sein; sie mufs für Eisen bei unverzweigter Leitung nicht unter 100, für Kupfer nicht unter 50 qmm. Querschnitt haben. Mit ihr müssen alle gröfseren Metallteile des Gebäudes, Dachrinnen, Wasser- und Gasleitungen u. s. w., metallisch verbunden werden. Besonders wesentlich aber ist eine gute Verbindung der Leitung mit dem Boden. Trockener Boden leitet die Elektricität nur schlecht. Womöglich sollte man das Ende der Leitung in das Grundwasser, oder in einen Teich oder Bach einsenken. Kann man aber gröfsere Wassermassen nicht erreichen, so mufs man wenigstens bis zu einer stets feuchten Erdschicht vordringen und dort die verzweigte Leitung in Kanäle betten, welche mit Holzkohle, die ein guter Leiter ist und zugleich vor Oxydation schützt, ausgefüllt sind, oder in Metallplatten mit grofser Oberfläche endigen lassen.

Neben der Ableitung des einschlagenden Blitzes können die Blitzableiter einen weiteren Nutzen dadurch gewähren, dafs sie die Entstehung einer Blitzentladung überhaupt verhindern, indem sie die zwischen Wolken und Erdboden bestehende Spannung durch Spitzenausstrahlung (173) zum allmählichen Ausgleich bringen. Derartige Endladungen werden zuweilen als Lichtbüschel nicht blofs an Blitzableitern, sondern auch an den Spitzen von Türmen, Windfahnen, Mastbäumen, ja sogar an den Haaren- und Kleidungsstücken der Menschen sichtbar; man nennt sie St.-Elmsfeuer.

Man kann auch (Melsens, 1865) das zu schützende Gebäude unter Weglassung der Auffangestangen mit einem Netze von zahlreichen Drähten, die zur Erde abgeleitet sind, umgeben und dasselbe dadurch gleichsam in eine weitmaschige Drahthülle einschliefsen, welche ihren Innenraum vor der Wirkung äufserer elektrischer Kräfte beschirmt (s. Schirmwirkung 174). Das Netz der Telegraphen- und Telephondrähte über den Häusern einer Stadt bildet einen riesigen Blitzableiter, dessen gute Erdleitung bei der Benutzung immerwährend von selbst geprüft wird.

Das Vorzeichen der Ladung der Wolken ist bald positiv, bald negativ, und kann während eines Gewitters mehrfach wechseln. Aber nicht blofs unter der influirenden Einwirkung einer elektrisch geladenen Wolke auf die Erde, sondern auch bei vollkommen wolkenlosem Himmel besteht in der Atmosphäre ein elektrisches Feld. Verbindet man die Blättchen eines empfindlichen Elektro-

skopes mit einer Spitze oder einer Flamme, so genügt auf freiem ebenem Terrain eine geringe Erhebung der Spitze oder Flamme, um die Blättchen zum Ausschlag zu bringen. Die Ladung, die das Elektroskop dabei annimmt, ist in der Regel positiv. Da sie dadurch zu stande kommt, dafs negative Elektricität aus der erhöhten Spitze ausströmt, so besteht also in der freien Athmosphäre ein Feld von solcher Richtung, dafs positive Elektricität in ihm nach der Erde zu bewegt wird. Statt dessen kann man auch sagen, dafs der Erdkörper sich auf einem relativ niedrigen Potential befindet, das mit der Erhebung in der Atmosphäre wächst (169). Den Betrag dieser Zunahme für eine Erhebung um 1 m bezeichnet man als das atmosphärische Potentialgefälle (F. **Exner**, 1886). Diese im Gegensatz zur Gewitterelektricität als normale Luftelektricität bezeichnete Erscheinung zeigt bei klarem Himmel eine regelmäfsige tägliche Periode, welche an vielen Orten in einem zweimaligen Ansteigen und Wiederabfallen besteht. Die Wirkung wächst nach Tagesanbruch anfangs rasch, dann sehr langsam bis zu einem vormittäglichen Maximum einige Stunden nach Sonnenaufgang; sie nimmt dann ab und wird am schwächsten einige Stunden vor Sonnenuntergang; nachher steigt sie wieder rasch und erreicht einige Stunden nach Sonnenuntergang zum zweiten Male einen höchsten Wert; während der Nacht nimmt sie wieder ab bis zu einem zweiten Minimum vor Tagesanbruch, worauf sie wieder zu steigen beginnt; etwa um 11 Uhr vormittags findet der Mittelwert des ganzen Tages statt. Im Winter ist die Wirkung beträchtlich stärker als im Sommer.

Zur Erklärung des normalen elektrischen Verhaltens der Atmosphäre kann man die Annahme machen, dafs die Erde eine negative elektrische Ladung besitzt (Peltier, Lamont, Exner). Da aber unter normalen Umständen das Potentialgefälle mit wachsender Erhebung in höhere Luftschichten abnimmt, so genügt obige Annahme nicht; sondern die Luft mufs aufserdem noch positive elektrische Ladung enthalten. Über den Ursprung dieser Ladungen sind vielfache Hypothesen aufgestellt worden, zwischen denen noch keine endgültige Entscheidung getroffen ist.

194. **Pyroelektricität.** Ein säulenförmiger Turmalinkrystall wird an einem Ende positiv, am anderen Ende negativ elektrisch, wenn man ihn erwärmt: dagegen wird jenes Ende negativ, dieses positiv elektrisch, wenn er sich abkühlt (Canton, 1759, Bergmann, 1767). Jenes Ende heifst der analoge, dieses der antiloge Pol und ihre Verbindungslinie die elektrische Achse. Bei unveränderter Temperatur ist der Krystall unelektrisch.

Krystalle, welche, wie Turmalin, Boracit u. a., bei Temperaturveränderungen zwei entgegengesetzt elektrische Pole annehmen, heifsen terminalpolarisch. Andere, wie Topas, Prehnit u. s. w., erhalten beim Erwärmen zwei gleichnamige, analoge oder antiloge Pole, weil, wie man annimmt, die zugehörigen entgegengesetzten Pole im Innern liegen; man nennt sie deswegen centralpolarisch (Hankel, seit 1839).

Die Elektricitätsverteilung auf der Oberfläche pyroelektrischer Krystalle läfst sich durch Aufstreuen des elektroskopischen Pulvers aus Mennige und Schwefel sichtbar machen (Kundt, 1883).

195. **Piezoelektricität.** Pyroelektrische Krystalle laden sich, wenn man auf sie in der Richtung der elektrischen Achse einen Druck ausübt, in demselben Sinne, wie bei Abkühlung, bei Verminderung des Drucks oder bei Zug, wie beim Erwärmen. Die hierbei entwickelten Elektricitätsmengen sind der Druckänderung proportional (J. u. P. Curie, 1881).

Auch nichtkrystallinische Körper werden durch Druck elektrisch. Die beiden Hälften eines durchschnittenen Korkes werden entgegengesetzt elektrisch, wenn man die Schnittflächen aneinander prefst.

---

# VIII. Elektrische Ströme.

196. **Endladungsströme. Konstante Ströme.** Wenn man zwei Leiter von verschiedenem elektrischem Potential durch einen Draht oder eine feuchte Schnur miteinander verbindet, so gleichen sich die elektrischen Ladungen durch den Draht hindurch so lange aus, bis beide Leiter das gleiche Potential erlangt haben. Verbindet man z. B. eine isolirte geladene Kugel mit der Erde, so verschwindet ihre Ladung, indem sie sich der unendlich viel gröſseren Erde mitteilt, und die Kugel nimmt das Potential der Erde an. Die kurze Zeit des Überganges aus dem ersten in den neuen Gleichgewichtszustand ist offenbar dadurch charakterisirt, daſs während dieser Zeit die elektrische Ladung durch den Draht hindurch sich ausgleicht; man sagt, die Elektricität strömt während dieser Zeit durch den Draht, oder ein elektrischer Strom flieſst in dem Draht. Seine Ursache ist offenbar die ursprüngliche Potentialdifferenz zwischen den beiden Körpern, die man verbunden hat. Da man sich diesen Zustand des Ausgleichs unter dem Bilde einer Bewegung der Elektricitäten vorstellt, so bezeichnet man die wirkende Potentialdifferenz auch als die treibende Kraft dieser Bewegung oder als elektromotorische Kraft.

Da nun der Strom dadurch entsteht, daſs die elektrische Ladung durch den Draht hindurch abflieſst, so vermindert sich infolge des Stromes die Ladung und mit ihr das Potential der isolirten Kugel, und der Strom erlischt nach kurzer Zeit. Wenn man dagegen die Kugel mit einer Elektricitätsquelle, z. B. einer in dauernder Rotation befindlichen Influenzmaschine verbindet, so ersetzt die von der Elektricitätsquelle zuströmende Elektricität die abströmende und man erhält einen dauernden Strom in dem zur Erde führenden Draht. Ersetzt man diesen durch einen schlechten Leiter (leinenes Band oder dergl.) von einiger Länge, so erfolgt der Ausgleich so langsam, daſs die Elektrisirmaschine imstande ist, die Ladung und das Potential der Kugel auf ihrer ursprünglichen Höhe zu erhalten. Man kann dann mit Hilfe eines Elektroskops nachweisen, nicht nur daſs zwischen der Kugel und der Erde trotz der leitenden Verbindung eine konstante Potentialdifferenz besteht, sondern auch daſs längs des feuchten Leiters ein gleichmäſsiges Herabsinken des Potentials von dem Werte auf der Kugel bis zu dem Werte 0 auf der Erde stattfindet. In diesem Falle besteht also in dem feuchten Leiter ein dauernder Ausgleichszustand oder ein konstanter elektrischer Strom.

Aber die elektrischen Ströme, die man auf diese Weise erhalten kann, sind viel zu schwach, um die eigentümlichen Wirkungen, die ein stromführender Leiter ausübt, an ihnen leicht erkennen oder bequem vorführen zu können. Man hat auch die Eigenschaften der elektrischen Ströme nicht auf diesem Wege, von den Entladungserscheinungen statisch geladener Körper aus gefunden, sondern auf einem ganz anderen Wege, der an eine von Galvani gemachte Entdeckung anknüpfte. Aus diesem Grunde bezeichnet man denjenigen Teil der Elektricitätslehre, der von den elektrischen Strömen und ihrer Entstehung handelt, auch häufig als Galvanismus.

197. **Galvanis Entdeckung.** Ludwig Galvani, Professor der Anatomie in Bologna, beobachtete eines Tages (6. Nov. 1780), dafs enthäutete Froschschenkel jedesmal zusammenzuckten, wenn aus dem Konduktor einer nahen Elektrisirmaschine ein Funke gezogen wurde. Galvani glaubte in dieser Erscheinung eine Bestätigung seiner Lieblingsansicht von einer dem Tierkörper eigenen Elektricität zu erblicken und widmete sich mit grofsem Eifer der weiteren Verfolgung der beobachteten Thatsache. Einmal hatte er mehrere Froschschenkel mittels Drahthaken an dem eisernen Geländer seines Balkons aufgehängt, um eine etwaige Einwirkung der Luftelektricität zu prüfen, und sah jedesmal lebhafte Zuckungen eintreten, sobald er einen der Froschschenkel gegen das Eisengeländer bog. Er überzeugte sich, dafs diese Erscheinung mit der Luftelektricität nichts zu thun hatte, aber jedesmal eintrat, wenn er die Nerven oder das Rückenmark des Frosches mit den Muskeln durch einen Metallbogen verband. Galvani meinte, dafs der Froschschenkel gleichsam als eine Leidener Flasche zu betrachten sei, deren entgegengesetzt elektrische Belegungen, nämlich der Nerv einerseits und die Muskeln andererseits, durch den Metallbogen sich entladen. Die von Galvani selbst bereits gemachte Bemerkung, dafs die Zuckungen lebhafter auftreten, wenn der Metallbogen aus zwei verschiedenen Metallen besteht, veranlafste jedoch Alexander Volta, Professor der Physik in Pavia, die Elektricitätsquelle in dem Metallbogen statt in dem Froschschenkel zu suchen. Indem Volta die Elektricitätsentwickelung im Tierkörper völlig leugnete, ging er freilich zu weit; denn zpäter hat sich gezeigt, dafs die Spitze eines frisch präparirten Muskels negativ, seine Breitseite positiv geladen ist (Du Bois-Reymond, 1848). Seine Ansicht führte ihn aber zu der wichtigen und folgenreichen Entdeckung, dafs, wenn man zwei verschiedenartige Metalle miteinander, oder Metalle mit leitenden Flüssigkeiten in Berührung bringt, die beiden sich berührenden Körper entgegengesetzt elektrisch werden. Diese Art der elektrischen Erregung hat man deswegen als Berührungs- oder Kontakt-Elektricität bezeichnet.

198. **Voltascher Becher. Galvanisches Element.** Die Spannungsdifferenzen, die man auf diesem Wege erhält, sind sehr gering. Sie sind aufserordentlich viel kleiner als die Spannungsdifferenzen, mit

denen wir es bei den elektrostatischen Versuchen zu thun hatten. Aber der Froschschenkel ist so empfindlich gegen die schwächsten elektrischen Reize, daſs er auch auf diese geringen Spannungsdifferenzen lebhaft reagirt. Diesem Umstande verdanken wir die Entdeckung dieser geringfügigen Spannungsdifferenzen. Um sie aber auch mit den üblichen Mitteln der Elektrostatik nachzuweisen, bediente sich Volta des von ihm erfundenen, auf ein Elektroskop geschraubten Kondensators (180), um die elektrischen Ladungen, welche durch jene geringen Potentialdifferenzen hervorgebracht werden, durch Ansammlung zu verdichten. Ersetzt man den Froschschenkel durch ein angefeuchtetes Stück Filz oder Filtrirpapier, berührt man die eine Seite desselben mit einer Kupfer-, die andere mit einer Zinkplatte und setzt nun die Kupferplatte mit der einen, die Zinkplatte mit der anderen Platte des Kondensators auf kurze Zeit durch Drähte in Verbindung, so gibt das Elektroskop beim Abheben der Kondensatorplatte einen Ausschlag, und zwar von positiver Ladung, wenn das Kupfer, von negativer, wenn das Zink mit der unteren Platte des Kondensators in Verbindung gebracht war. Durch die Berührung mit der Kupfer- und der Zinkplatte hatten sich die beiden Belegungen des Kondensators bis zu einer gewissen aber kleinen Potentialdifferenz geladen. Dabei hatten sich die gegenüberliegenden Flächen der Kondensatorplatten mit positiven und negativen sich gegenseitig bindenden Elektricitätsmengen belegt. Beim Abheben der oberen Platte wird die Elektricität der unteren frei und bringt die Blättchen des Elektroskops zum Ausschlag. Statt die beiden Metallplatten mit einem angefeuchteten Stoff in Berührung zu bringen, kann man sie einfacher und bequemer in ein Gefäſs mit Wasser oder verdünnter Schwefelsäure eintauchen. Eine solche Vorrichtung nennt man einen Voltaschen Becher oder ein galvanisches Element. Die aus der Flüssigkeit herausragenden Enden der Metalle nennt man die Pole des Elements, und bezeichnet entsprechend dem Sinne der zwischen ihnen bestehenden Potentialdifferenz den Kupferpol als den positiven, den Zinkpol als den negativen Pol des Elements.

Die Potentialdiffernz zwischen den Polen ist unabhängig von der Gröſse der Berührungsfläche zwischen Metall und Flüssigkeit und den sonstigen Dimensionen des Elements; sie ist gleich groſs, ob man die Metalle in Form von dünnen Drähten oder von breiten Platten in die Flüssigkeit eintaucht. Sie hängt nur von der stofflichen Natur der drei Körper ab, aus denen sich das Element zusammensetzt.

199. **Sitz der elektromotorischen Kraft.** Diese Differenz bleibt auch unverändert, wenn man das Element etwa auf isolirter Unterlage aufstellt und durch äuſsere Zufuhr von Elektricität ladet. Dann steigt das Potential auf allen drei Bestandteilen; aber die Differenz des Potentials zwischen ihnen bleibt die gleiche. Da jeder Bestandteil als ein Leiter auf konstantem Potentiale ist, solange die Elektricitäten

im Gleichgewichtszustande sind, so bestehen offenbar Potentialsprünge an den Berührungsflächen der Metalle mit der Flüssigkeit. Hier ist der Sitz dor elektromotorischen Kraft, und die Spannungsdifferenz an den Polen ist offenbar die Summe der Potentialsprünge an den verschiedenen Berührungsflächen. Doch müssen wir berücksichtigen, dafs auch zwischen den verschiedenen Metallen eine Potentialdifferenz bestehen kann. Verbinden wir den Kupfer- und Zinkpol durch kupferne Drähte mit den Platten des Kondensators, so ist die ganze Potentialdifferenz an den Enden dieser Drähte offenbar die Summe der drei Potentialdifferenzen Kupfer/Zink + Zink/Flüssigkeit + Flüssigkeit/Kupfer.

Volta bemühte sich, und nach ihm viele andere, die einzelnen Potentialdifferenzen zwischen zwei Körpern nachzuweisen und zu messen, vor allem die Potentialdifferenz zwischen zwei sich berührenden Metallplatten. Er bediente sich auch hierbei seines Kondensator-Elektroskops. Aber die Deutung, die Volta den Resultaten dieses unter den Namen des Voltaschen Fundamentalversuches bekannten Versuches gegeben hat, wird heute nicht mehr anerkannt. Während Volta zu der Auffassung kam, dafs die Spannungsdifferenz an den Polen seines Elemetns wesentlich durch den Potentialsprung zwischen den beiden Metallen bedingt sei, ist man heute ganz der gegenteiligen Ansicht. Über den Betrag der elektromotorischen Kraft zwischen zwei Metallen vermag man auch heute noch keine bestimmten Angaben zu machen, da es keine einwandfreien Methoden zu ihrer Messung gibt. Dagegen läfst sich die elektromotorische Kraft zwischen Metallen nnd Flüssigkeiten in manchen Fällen messen, in manchen auch auf Grund besonderer Vorstellungen berechnen. Für die Wirksamkeit der galvanischen Elemente kommen wesentlich diese Gröfsen in Betracht.

Die Versuche haben ergeben, dafs die meisten Metalle, wenn sie in Schwefelsäure getaucht werden, negativ elektrisch werden, die Säuren positiv. Aber die Gröfse der entstehenden Potentialunterschiede ist für die verschiedenen Metalle sehr verschieden. Z. B. erlangt Zink eine viel stärkere negative Spannung als Kupfer gegen Schwefelsäure.

200. **Voltasches Spannungsgesetz.** Denkt man sich in der Voltaschen Kombination: Kupfer-Zink-Schwefelsäure-Kupfer den flüssigen Leiter durch ein drittes Metall ersetzt, so erhält man am Kondensator-Elektroskop keinen Ausschlag. Das gilt, welche Metalle man auch in dieser Weise miteinander kombinieren mag. Auch Kohle und einige Metalloxyde verhalten sich so. Wenn also zwischen den verschiedenen Metallen Spannungsdifferenzen bestehen, so sind dieselben jedenfalls so beschaffen, dafs bei obiger Zusammenstellung ihre Summe gleich Null ist. Hat man drei Metalle $a$, $b$, $c$, so ist also $a/b + b/c + c/a = O$ oder $a/b + b/c = - c/a = + a/c$.

Volta hatte auf Grund seiner Messungen die Metalle in eine Reihe geordnet, in der jedes Metall in Berührung mit einem folgenden positiv, mit einem vorhergehenden negativ elektrisch wird — Volta'sche Spannungsreihe, die der Reibungsreihe (157) analog ist. Je weiter die Metalle in dieser Reihe auseinander stehen, um so gröfser ist ihre Spannungsdifferenz. Gleichviel, wie grofs nun diese

Spannungsdifferenzen auch sein mögen, jedenfalls gilt der obige Satz, dafs die Summe der Spannungsdifferenzen für beliebig viele hintereinander geschaltete Metalle gleich der Spannungsdifferenz zwischen dem ersten und letzten Metalle ist. Dieser Satz heifst das Voltasche Spannungsgesetz. Volta nannte diejenigen Stoffe, welche diesem Gesetz gehorchen, Leiter erster Klasse und im Gegensatz dazu die leitenden Flüssigkeiten (Wasser, Säuren, Alkalien, Salzlösungen), welche sich diesem Gesetze nicht fügen, Leiter zweiter Klasse. Verbindet man die Enden einer beliebigen Kombination von Leitern erster Klasse durch einen Metalldraht, so ist die Elektricität auf diesem System trotz der Potentialdifferenzen zwischen seinen Teilen im Gleichgewicht und man erhält keinen Strom. Doch gilt dieser Satz nur, wenn die Berührungsstellen der einzelnen Teile sich sämtlich auf derselben Temperatur befinden. Verbindet man dagegen die Enden eines Voltaschen Bechers durch einen Draht, so erhält man einen elektrischen Strom.

201. **Voltasche Säule.** Man mag noch so viele Plattenpaare aus Metallen (Leitern erster Klasse) aufeinander schichten, so wird die Potentitialdifferenz zwischen den Endplatten vermöge des Spannungsgesetzes doch immer dieselbe bleiben, als wenn die Endplatten sich unmittelbar berührten. Indem Volta auch Flüssigkeiten (Leiter zweiter Klasse) zu Hilfe nahm, gelang es ihm, die schwache elektromotorische Wirkung bis zu hohen Potentialdifferenzen zu steigern.

Legt man auf eine isolierte Kupferplatte eine mit verdünnter Schwefelsäure getränkte Scheibe von Pappe oder Filz, und darauf eine Zinkplatte, so sind an den Berührungsflächen der Metalle mit der Flüssigkeit elektromotorische Kräfte thätig, deren jede negative Elektricität auf das Metall, positive Elektricität in die Flüssigkeit und das damit leidend verbundene andere Metall treibt. Da aber die elektrische Erregung zwischen Zink und Schwefelsäure gröfser ist als zwischen Kupfer und Schwefelsäure, so wird der Kupferplatte von der Zinkfläche her mehr positive Elektricität zugeführt, als sie negative vermöge ihrer eigenen Berührung mit der Schwefelsäure aufnimmt, und in der Zinkplatte wird in demselben Betrage mehr negative Elektricität erregt, als positive von der Kupferfläche her auf sie übergegangen ist. Die Kupferplatte wird also jetzt positiv, die Zinkplatte ebenso stark negativ geladen sein mit einer Spannungsdifferenz, welche gleich dem Unterschied der elektromotorischen Kräfte Kupfer-Schwefelsäure und Zink-Schwefelsäure, oder was dasselbe ist, gleich der Summe Kupfer-Schwefelsäure und Schwefelsäure-Zink ist.

Man kann nun die elektromotorische Wirkung, welche bei einem Plattenpaar nur gering ist, zu hohen Potentialdifferenzen steigern, wenn man, wie Volta (1800) gethan hat, viele Elemente immer in der nämlichen Reihenfolge Kupfer-Flüssigkeit-Zink zu einer Säule aufeinander schichtet. In jedem Elemente ist nämlich die gleiche elektromotorische Kraft wirksam und treibt die von ihr erregten Elek-

tricitäten nach entgegensetzten Seiten, die positive auf alle nach dem Kupferende zu, die negative auf alle nach dem Zinkende zu gelegenen Platten. Die Endplatten müssen daher einen Spannungsunterschied erreichen, der im Verhältnis der Anzahl der Elemente vervielfacht ist, und zwar wird das Kupfernde positiv, das Zinkende ebenso stark negativ elektrisch sein, während die Mitte der Säule unelektrisch ist, weil hier von beiden Seiten gleichgrofse aber entgegengesetzte Spannungen zusammentreffen.

Die Fig. 165 zeigt die Voltasche Säule in ihrer ursprünglichen Gestalt; sie ist zwischen Glasstäben aufgebaut, die in gefirniste Holzplatten $a$ und $b$ eingelassen sind. Die beiden Enden der Säule nennt man ihre Pole, und zwar ist das Kupferende der positive, das Zinkende der negative Pol. Befestigt man (Kupfer-)Drähte an den Endplatten, so erscheinen die Pole an die Enden dieser Drähte (Elektroden) verlegt. Solange die Drähte nicht miteinander in Berührung gebracht werden, ist die Säule offen und zeigt elektrometrisch mefsbare Spannungserscheinungen. Ist $V$ die von einem Element hervorgebrachte Potentialdifferenz, und $n$ die Anzahl der Plattenpaare, so ist $n\,V$ die Potentialdifferenz der ganzen Säule; wird ihr eines Ende nach der Erde abgeleitet, d. i. auf das Potential Null gebrecht, so hat das andere Ende das Potential $\pm\, n\,V$, und in der Mitte der Säule ist das Potential $\pm\, {}^1/_2\, n\,V$. Wird die mittelste Platte der Säule mit der Erde verbunden, so ist das Potential am positiven Pol $+\, {}^1/_2\, n\,V$, am negativen $-\, {}^1/_2\, n\,V$, also der Potentialunterschied wiederum $n\,V$. Diese Potentialdifferenz bleibt unverändert, wie man auch die Potentialwerte der Pole selbst, etwa durch Zuleitung von Elektricität von aufsen her, abändern mag.

202. **Die trockene** oder **Zambonische Säule** (Ritter, 1802; Behrens, 1806; Zamboni, 1812) ist eine Voltasche Säule von sehr vielen (1000—2000) Plattenpaaren, in welcher lufttrockenes Papier die Stelle der feuchten Filzscheiben, unechte Vergoldung (Kupferbronze) und unechte Versilberung (Zinn) die Stelle der Metalle Kupfer und Zink vertritt. Um eine trockene Säule zu verfertigen, werden Blätter von Gold- und Silberpapier mit der Papierseite zusammengeklebt, Scheiben daraus geschnitten, diese in einer Glasröhre dicht aufeinander geschichtet, so dafs die Zinnseite jeder Scheibe auf die Kupferseite der vorhergehenden zu liegen kommt, und die Glasröhre durch aufgekittete Messingfassungen geschlossen. Die im lufttrockenen Papier noch immer festgehaltene Feuchtigkeit wirkt auf die Metalle in derselben Weise elektrisch erregend wie die Flüssigkeit in einer gewöhnlichen Voltaschen Säule; die Enden oder Pole der isolirten Säule laden sich daher bis zu einem der Anzahl der Plattenpaare proportionalen Spannungsunterschied mit entgegengesetzten Elektricitäten, das Kupferende positiv, das Zinnende negativ. Da die in jedem Plattenpaar unausgesetzt wirksame elektromotorische Kraft diesen Spannungsunterschied aufrecht erhält, und die etwa entzogene Elektricität sofort wieder ersetzt, so bleiben die Pole viele Jahre

lang mit unverminderter Stärke entgegengesetzt elektrisch. In der Fig. 166 ist eine wagrecht liegende trockene Säule dargestellt, deren Pole mittels der Leitungsdrähte *c* und *d* nach den Platten *a* und *b* verlegt sind, von denen demnach die eine stets positiv, die andere ebenso stark negativ elektrisch ist. Über die beiden Polplatten ist eine Glasglocke gestülpt, von deren Wölbung, an einem oben mit einer Kugel versehenen Messingstäbchen befestigt, ein schmales Goldblättchen zwischen die Pole herabhängt Ein solches Instrument ist ein sehr empfindliches Elektroskop (Säulenelektroskop; Behrens, 1806, Bohnenberger 1817, Fechner 1829). Erteilt man dem Goldblatt auch nur eine schwache Ladung, so wird es von dem gleichnamigen Pole der Säule abgestofsen, von dem ungleichnamigen an-

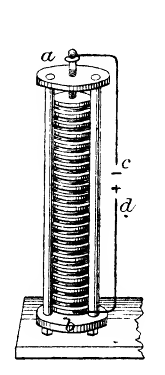


Fig. 165.
Voltasche Säule.

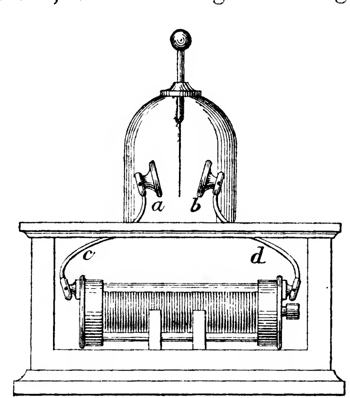


Fig. 166.
Säulenelektroskop.

gezogen und schlägt, je nach dem Vorzeichen seiner Ladung, nach der einen oder der anderen Seite aus. Auch bei dem Quadrantenelektrometer (188) kann die trockene Säule Verwendung finden, um die Nadel des Instruments auf ein konstantes hohes Potential zu bringen.

203. **Bechersäule. Galvanische Batterie.** Da der Aufbau einer Säule mit feuchten Filz- oder Pappscheiben mancherlei Übelstände mit sich führt, so kommt die Voltasche Säule in ihrer ursprünglichen Gestalt gegenwärtig nicht mehr zur Verwendung. In derselben Weise aber, wie in der Voltaschen Säule viele Elemente aus Kupfer-, Filz- und Zinkplatten aufeinander geschichtet sind, um an den Enden der Säule eine höhere Spannungsdifferenz zu erzielen, kann man eine gröfsere Anzahl von Voltaschen Bechern oder galvanischen Elementen „hintereinander schalten", indem man den Zinkpol des einen Bechers mit dem Kupferpol des nächsten Bechers durch einen Draht oder Streifen von Kupfer verbindet, zu welchem Zweck die Platten gewöhnlich mit Klemmschrauben versehen sind (Bechersäule, Fig. 167). Eine solche Verbindung mehrerer oder vieler galvanischer

Elemente nennt man eine galvanische Batterie. Die Spannungsdifferenz an den Enden einer solchen Batterie ist ebenso wie bei der Säule, $n V$, wenn $n$ die Anzahl der Elemente und $V$ die Spannungsdifferenz des einzelnen Elements ist. Eine aus zahlreichen Elementen von Kupfer und Zink in gewöhnlichem Wasser zusammengestellte „Wasserbatterie“ eignet sich ebenso wie die Zambonische Säule zur Ladung des Quadrantelektrometers.

204. **Der elektrische (galvanische) Strom.** Werden die Drahtenden (Elektroden) der Voltaschen Säule oder der galvanischen Batterie miteinander in Berührung gebracht und hiermit die Säule geschlossen, so gleichen sich die an den Endplatten der offenen Säule angehäuften Elektricitäten durch den nunmehr hergestellten Schliefsungsbogen aus, indem positive Elektricität von dem Kupferende der Säule durch den Schliefsungsdraht nach dem Zinkende und ebensoviel negative von dem Zinkende nach dem Kupfer-

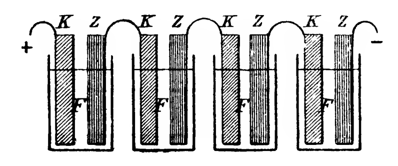



Fig. 167.
Bechersäule.

ende strömt. Man kann die Thatsache dieses Ausgleichs in derselben Weise wie bei der Entladung einer Batterie von Leydener Flaschen, durch die dabei entstehende Wärmeentwickelung nachweisen, indem man die Enden der Batterie durch ein Stück eines passend gewählten dünnen Drahtes verbindet. Man erhält dann ein Glühen des Drahtes, aber nicht ein kurz vorübergehendes, wie bei der Entladung einer Flaschenbatterie, sondern ein dauerndes, das uns das Bestehen eines dauernden elektrischen Ausgleichs in dem Drahte anzeigt. Dieser elektrische oder galvanische Strom fliefst dauernd und stetig, weil die in den Elementen der Säule thätigen elektromotorischen Kräfte in ihrem Bestreben, die Spannungsunterschiede aufrecht zu erhalten, unausgesetzt positive Elektricität nach dem Kupferende, negative nach dem Zinkende und von hier aus durch den Schliefsungsdraht treiben; die geschlossene Säule selbst wird also ebenfalls von dem elektrischen Strome durchflossen und bildet daher mit dem Schliefsungsbogen zusammen einen ununterbrochenen Schliefsungskreis, in welchem sich schon in sehr kurzer Zeit nach erfolgter Schliefsung ein stationärer Bewegungszustand derart herstellt, dafs durch jeden Querschnitt des Schliefsungskreises in gleicher Zeit gleichgrofse Mengen entgegengesetzter Elektricitäten in entgegengesetzter Richtung hindurchgehen. Man nennt die Elektricitätsmenge, welche in 1 Sekunde durch einen beliebigen Querschnitt des Schliefsungskreises geht, Stromstärke, und bezeichnet als Strom-

richtung diejenige Richtung, in welcher die positive Elektricität fliefst. Man sagt also: der galvanische Strom fliefst im Schliefsungsdraht vom Kupferpol zum Zinkpol, in der Säule dagegen vom Zink zum Kupfer. Da sonach in jedem Element die positive Elektricität von der Zinkplatte durch die Flüssigkeit zur Kupferplatte strömt, so nennt man das Zink das elektropositive, das Kupfer (oder seinen Stellvertreter) das elektronegative Metall.

205. **Andere Formen der galvanischen Elemente.** Man erreicht einen gröfseren Spannungsunterschied, als ihn das Voltasche Element gibt, wenn man dem Zink eine Platte (Leiter erster Klasse)



Fig. 168.
Flaschenelement.

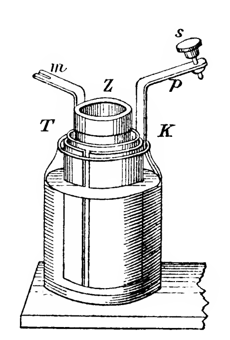



Fig. 169.
Daniellsches Element.

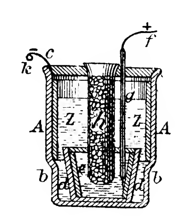



Fig. 170.
Meidingersches Element.

gegenüberstellt, welche von der Flüssigkeit noch weniger als Kupfer elektrisch erregt wird, nämlich Platin oder Kohle. So besteht z. B. das Smeesche Element aus einer Zink- und einer mit Platinschwarz überzogenen Platin- oder Silberplatte in verdünnter Schwefelsäure.

Das sehr bequeme und für sich allein schon kräftig wirksame von Bunsen angegebene Flaschenelement (Fig. 168) enthält zwei miteinander leitend verbundene Platten von Gaskohle (Retortenkohle), welche in eine Chromsäurelösung (oder in ein Gemisch von Kaliumbichromat und Schwefelsäure) tauchen, die den bauchigen Teil eines flaschenförmigen Gefäfses ausfüllt; zwischen beiden befindet sich eine Zinkplatte, welche mittels eines durch den Deckel des Gefäfses gehenden Messingstabes beim Gebrauch in die Flüssigkeit hinabgeschoben wird; von zwei auf dem Deckel angebrachten messingenen Klemmschrauben, welche zur Aufnahme der Poldrähte bestimmt sind, ist die eine mit den beiden Kohlenplatten, die andere mit der Zinkplatte verbunden. Bei der Bunsenschen Chromsäure-Tauchbatterie sind die Plattenpaare (Kohle und Zink) an einem gemeinsamen Holzrahmen befestigt, mittels dessen sie gleichzeitig in die darunter stehenden Glasgefäfse mit Chromsäureflüssigkeit eingesenkt werden können.

Die bisher angeführten mit einer einzigen Flüssigkeit gefüllten Elemente geben zwar anfangs einen starken Strom; die Wirkung nimmt aber sehr rasch ab, weil bei der Stromleitung durch die

Flüssigkeit chemische Veränderungen eintreten, infolge deren die elektromotorische Kraft geschwächt wird; man nennt sie inkonstante (unbeständige) Elemente. Man kann diese Schwächung dadurch verhindern, dafs man jede der Platten in eine besondere geeignet gewählte Flüssigkeit eintauchen läfst, und erhält so die konstanten (beständigen) Elemente, welche einen längere Zeit mit gleichbleibender Stärke andauernden Strom liefern

Das Daniellsche (1836) Element (Fig. 169) besteht aus Zink in verdünnter Schwefelsäure oder Zinksulfatlösung und Kupfer in einer gesättigten Lösung von Kupfervitriol (Kupfersulfat); die verdünnte Schwefelsäure befindet sich in einem cylindrischen Gefäfs *T* aus porösem Thon (Biskuit), die Kupfervitriollösung in dem Glasgefäfs selbst; die feinporöse Thonwand verhindert die Vermischung der Flüssigkeiten, aber nicht den Durchgang des Stromes, da sie wie Fliefspapier von der Flüssigkeit durchtränkt und dadurch leitend wird. Die Zinkplatte *Z* und die Kupferplatte *K* sind cylindrisch gebogen, um sich der Form der Gefäfse anzubequemen. Zur Verbindung der Zink- und der Kupferplatte mit den Nachbarelementen oder mit den Poldrähten dienen die an sie angelöteten Kupferstreifen *m* und *p* und die Klemmschraube *s*.

Eine praktisch bewährte Abänderung des Daniellschen Elements ist das Meidingersche (1859, Fig. 170) Auf einem Vorsprung *b b* der Glaswand des Gefäfses *A A* steht eine cylindrisch gebogene Zinkplatte *Z Z*, an welche der Leitungsdraht *c k* angelötet ist. In dem auf den Boden des Glases *A A* angekitteten kleineren Glasgefäfs *d d* befindet sich ein rundgebogenes Kupferblech *e*, zu welchem ein durch Kautschukumhüllung isolirter Kupferdraht *f g* hinabreicht. Von dem Deckel des Gefäfses *A A* hängt ein weites, unten mit einer Öffnung versehenes Glasrohr *h* bis ins Gefäfs *d d* hinab. Dieses Rohr *h* wird mit Stücken von Kupfervitriol, das Gefäfs *A A* mit einer Lösung von Bittersalz (Magnesiumsulfat) gefüllt; indem das Kupfersulfat sich auflöst, bildet es eine Lösung, welche wegen ihres gröfseren spezifischen Gewichts in dem Gefäfs *d d* in Berührung mit der Kupferplatte bleibt, während die Zinkplatte von der leichteren Bittersalzlösung umgeben ist; so wird ohne Anwendung einer Thonscheidewand eine genügende Trennung der beiden Salzlösungen erreicht.

Das Grovesche Element (1839) besteht aus Zink in verdünnter Schwefelsäure und innerhalb einer Thonzelle Platin in konzentrirter Salpetersäure. Im Bunsenschen Element (1842) ist das Platin durch die ebenso wirksame Kohle ersetzt. Die Fig. 171 stellt eine aus drei Bunsenschen Elementen zusammengesetzte Batterie dar, bei welchem sich die Kohle in Form von dicken Stäben mit der Salpetersäure in der porösen Thonzelle, das Zink mit der verdünnten Schwefelsäure aufserhalb in einem glasirten Thongefäfs befindet.

Bei dem Element von Leclanché (1868, Fig. 172) ist in einer porösen Thonzelle eine Kohlenplatte *K* mit einem aus Braunstein

und Kohle gemischten groben Pulver umgeben, während aufserhalb in dem Glasgefäfs eine Salmiaklösung den Zinkstab *Z* umgibt.

Bei allen diesen Elementen wird das Zink, um es während der Unthätigkeit der Batterie vor dem unmittelbaren Angriff der Schwefelsäure zu schützen, amalgamirt, d. h. mit Quecksilber eingerieben, bis sich die Oberfläche mit einer Verbindung von Zink und Quecksilber (Zinkamalgam) bedeckt hat.

In den Trockenelementen ist die Flüssigkeit ersetzt durch eine mit geeigneten Lösungen durchtränkte und sodann erhärtete Füllmasse, zu deren Herstellung Gips, Kalkhydrat, Kreide, Thon und dergl. verwendet werden. Bei den in den Handel gebrachten Trockenelementen bildet gewöhnlich die äufsere Umhüllung aus Zink zugleich die eine Erregerplatte, die andere besteht aus Retortenkohle.

Das wichtigste galvanische Element der Neuzeit ist das „Sekundärelement“ oder der „Akkumulator“, der die Erzeugung elektrischer Ströme im grofsen gestattet. Er entpricht in seiner

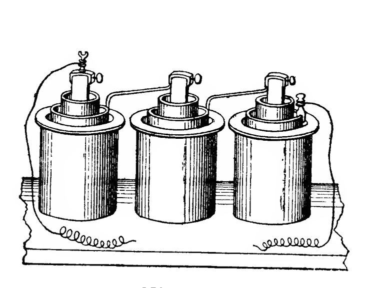


Fig. 171.
Bunsensche Elemente.

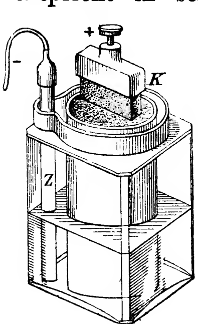



Fig. 172.
Leclanchés Element.

Form dem alten Voltaschen Element, das aus zwei Metallen in verdünnter Schwefelsäure bestand, und enthält statt des Zinks eine gewöhnliche Bleiplatte, statt des Kupfers eine mit Bleiüberoxyd überzogene Bleiplatte. Während aber die oben beschriebenen Elemente aus ihren Bestandteilen zum Gebrauche fertig zusammengesetzt werden (Primärelemente), werden die Sekundärelemente mit Hilfe des galvanischen Stromes zum Gebrauche hergestellt, und können, wenn sich durch den Gebrauch ihre elektromotorische Kraft erschöpft hat, mittels des Stromes wieder erneuert, „aufgeladen“ werden. Wir kommen wegen dieses Umstandes, dem sie ihren Namen verdanken, an einer anderen Stelle noch einmal auf diese Elemente zu sprechen.

Für die Messung der elektromotorischen Kräfte der Elemente ist es nützlich, ein Element von sehr konstanter elektromotorischer Kraft zu besitzen, mit dem man die anderen Elemente vergleicht. Man nennt solche Elemente „Normalelemente“. Als solches ist von Latimer Clark ein Element empfohlen worden, das aus Quecksilber als positivem Pol, einem Brei aus

schwefelsaurem Quecksilberoxydul und schwefelsaurem Zink und einem Zinkstab als negativem Pol besteht. Noch bequemer als das Clark-Element, dessen elektromotorische Kraft sich mit der Temperatur ändert, ist das Weston-Element, das ebenso wie das Clark-Element zusammengesetzt ist, nur daſs es schwefelsaures Cadmium und einen Cadmiumstab statt des schwefelsauren Zinks und des Zinkstabes enthält. Seine elektromotorische Kraft ist von der Temperatur fast unabhängig. Beide Elemente bleiben in offenem Zustande unverändert. Bei stärkerer Stromentnahme ändern sie sich; sie dürfen daher nur mit ganz schwachen Strömen benutzt werden.

206. **Stromwender (Kommutatoren, Gyrotrope)** dienen dazu, um den galvanischen Strom bequem zu schlieſsen und zu öffnen, und im Schlieſsungsbogen nach Belieben umzukehren. Von den zahlreichen Formen mögen die folgenden als Beispiele dienen. Der Stromwender von Pohl (1828, Fig. 173) besteht aus einem Brettchen mit sechs Quecksilbernäpfchen, von welchen die an den Ecken liegenden durch diagonale Drähte paarweise verbunden sind. Zwei dreiarmige Metallbügel sind durch einen Glasstab zu einer Wippe vereinigt, deren mittlere Arme in die zwei mittleren Näpfchen tauchen; in diese Näpfchen sind auch die Enden der Poldrähte der Batterie eingesenkt, während die Enden der Leitung, in welcher der Strom umgewendet werden soll, in die zwei Ecknäpfe rechts tauchen. Liegt die Wippe wie in der Figur, so flieſst der Strom in der diese Näpfe verbindenden Leitung nach der durch den Pfeil angegebenen Richtung; legt man aber die Wippe um, so daſs ihre hinteren Arme jetzt in die Ecknäpfe links eintauchen, so flieſst der Strom der Leitung in der entgegengesetzten Richtung wie vorhin. Der Stromwender von Ruhmkorff (1846, Fig. 174) besteht aus einer Elfenbeinwalze, welche mit zwei diametral gegenüberliegenden Messingwülsten versehen ist und von zwei metallenen Zapfen getragen wird, deren jeder im Innern der Walze mit einem der Wülste leitend verbunden ist. Die beiden Zapfen stehen durch ihre messingenen Lager mit Klemmschrauben, welche die Poldrähte aufnehmen, in Verbindung, während die zwei Klemmschrauben, in welche die Enden der Leitung geklemmt werden, auf Messingblechstreifen, die gegen die Walze federn, leitend aufgesetzt sind. Wird

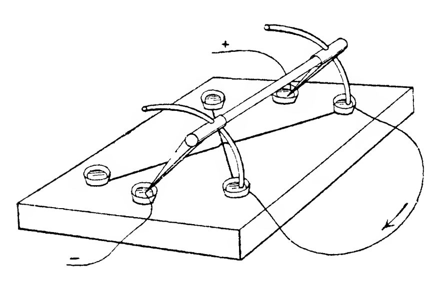


Fig. 173.
Pohls Stromwender.

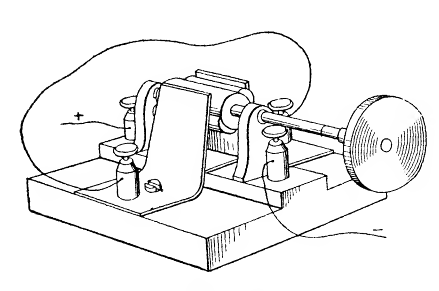


Fig. 174.
Ruhmkorffs Stromwender.

die Walze mittels des Griffes so gestellt, dafs die Wülste mit den Federn in Berührung kommen, so geht der Strom in der einen Richtung durch die Leitung; dreht man aber die Walze um 180°, so kehrt sich der Strom in der Leitung um. Berühren die Messingwülste die Blechstreifen nicht, so ist der Strom unterbrochen.

207. **Elektrolyse.** Im Jahre 1800 entdeckte Ritter, dafs flüssige Leiter beim Durchgange des galvanischen Stromes chemisch zerlegt werden. Taucht man zwei Platinplatten, welche mit den Polen einer galvanischen Batterie verbunden sind (die Elektroden), in Wasser, welchem etwas Schwefelsäure zugesetzt ist, so sieht man an beiden Platten Glasbläschen aufsteigen, nicht aber in der Flüssigkeit zwischen den Platten. Mittels der in Fig. 175 dargestellten Einrichtung lassen sich die an jeder Polplatte entwickelten Gasmengen besonders auffangen. Das angesäuerte Wasser befindet sich in einem trichterförmigen Glasgefäfs, durch dessen Boden zwei isolirte Zuleitungsdrähte *f* und *f′* hindurchgehen, welche die Platinplatten tragen; über jede Platinplatte ist eine oben geschlossene und anfangs ganz mit der Flüssigkeit gefüllte Glasröhre gestülpt, so dafs die von den Polplatten aufsteigenden Gasblasen sich im oberen Teil der Röhren bei *H* und *O* sammeln. Man bemerkt bald, dafs das am negativen (—) Pol ausgeschiedene Gas einen doppelt so grofsen Raum einnimmt als das am positiven (+) Pol entwickelte; jenes läfst sich anzünden und verbrennt mit schwach leuchtender Flamme, dieses dagegen ist nicht brennbar, bringt aber einen hineingetauchten glimmenden Holzspan zum hellen Aufflammen. Aus diesen Erscheinungen läfst sich schliefsen, dafs das erstere Gas Wasserstoff (*H*), das letztere Sauerstoff (*O*) ist.

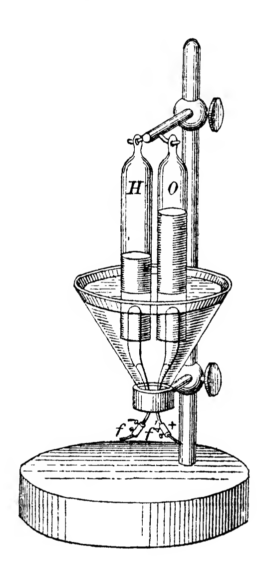


Fig. 175.
Wasserzersetzungsapparat.

Diese beiden Grundstoffe sind aber die Bestandteile des Wassers, und man weifs, dafs gerade zwei Raumteile Wasserstoffgas ($H_2$) sich mit einem Raumteile Sauerstoff ($O$) zu zwei Raumteilen Wasserdampf ($H_2O$) vereinigen. Der zwischen den Elektroden durch die Flüssigkeit übergehende Strom hat also das Wasser zerlegt, indem er den Wasserstoff als elektropositiven Bestandteil (Kation)[1]) an

[1] Faraday hat zur bequemen Bezeichnung der bei der elektrochemischen Zersetzung vorkommenden Begriffe gewisse Benennungen eingeführt, welche allgemein Eingang gefunden haben. Nach ihm heifst der Vorgang selbst Elektrolyse, und eine jede durch den galvanischen Strom zersetzbare chemische Verbindung Elektrolyt; die Polplatten, durch welche der Strom ein- und austritt, heifsen die Elektroden („Elektricitätswege"), und zwar die positive Elektrode Anode („Hinaufweg"), die negative Kathode („Hinabweg"). Die

der negativen Elektrode (Kathode), den Sauerstoff als elektronegativen Bestandteil (Anion) an der positiven Elektrode (Anode) abschied, und zwar beide Grundstoffe in demselben Mengenverhältnis, in welchem sie im Wasser miteinander vereinigt waren.

Dafs aber hierbei das Wasser nicht unmittelbar durch den Strom zersetzt wird, erkennt man, wenn man den Apparat mit ganz reinem (destillirtem) Wasser füllt; alsdann entwickelt sich kein Gas an den Platinplatten, und der Strom geht zwischen ihnen gar nicht über; das reine Wasser ist kein Elektrolyt. Das, was durch den Strom zersetzt wird, kann demnach nur die Schwefelsäure ($H_2SO_4$) sein. Dieselbe besteht aus Wasserstoff einerseits und Schwefel nebst Sauerstoff andererseits und wird derart zerlegt, dafs der Wasserstoff ($H_2$) an der negativen, der Rest ($SO_4$) an der positiven Polplatte ausgeschieden wird. Dieser „Schwefelsäurerest" kann aber für sich nicht bestehen, sondern ergänzt sich sofort wieder zu Schwefelsäure, indem er dem Wasser die hierzu nötige Menge Wasserstoff entzieht und dadurch die entsprechende Menge Sauerstoff in Freiheit setzt, welcher sich an der positiven Platte entwickelt ($SO_4 + H_2O = H_2SO_4 + O$). Dieser Sauerstoff ist demnach nicht unmittelbar durch elektrochemische Zersetzung, sondern durch mittelbare Einwirkung (sekundäre Aktion) des elektrochemisch abgeschiedenen Säurerestes auf das Lösungsmittel der Schwefelsäure, das Wasser, entstanden. Der schliefsliche Erfolg ist aber doch derselbe, als ob das Wasser zersetzt worden, die Schwefelsäure dagegen, da sie sich sofort wieder zurückbildet, unangetastet geblieben wäre; man kann daher den ganzen Vorgang immerhin als Wasserzersetzung bezeichnen.

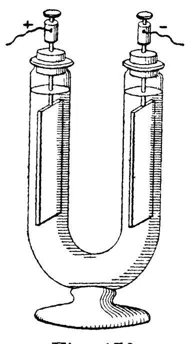



Fig. 176.
U-förmiger Zersetzungsapparat.

In ganz ähnlicher Weise wie die Schwefelsäure werden Salze, die in Wasser gelöst sind, durch den galvanischen Strom zersetzt. Glaubersalz (schwefelsaures Natrium, $Na_2SO_4$) z. B. ist anzusehen als Schwefelsäure, in welcher der Wasserstoff durch Natrium ($Na$) vertreten ist. Demnach wird zunächst Natrium am negativen, der Schwefelsäurerest am positiven Pol sich ausscheiden; das Natrium aber entzieht dem Wasser Sauerstoff, um Natronlauge (Natriumhydroxyd, $NaHO$) zu bilden ($Na_2 + 2H_2O = 2\,NaHO + H_2$), und der Schwefelsäurerest ergänzt sich wie vorhin zu Schwefelsäure, indem er Wasserstoff aus dem Wasser entnimmt und Sauerstoff frei macht. Es werden sich daher wiederum Sauerstoff- und Wasserstoffgas am positiven und negativen Pol entwickeln, aufserdem wird aber dort freie Schwefelsäure, hier Natronlauge auftreten. Man kann

abgeschiedenen Bestandteile heifsen Ionen (richtiger Ionten, die „Gehenden"), und zwar der zur Anode gehende Bestandteil das Anion (das „Hinaufgehende"), der zur Kathode gehende Bestandteil das Kation (das „Hinabgehende").

letztere Produkte sichtbar nachweisen, wenn man die an sich farblose Glaubersalzlösung durch Blaukrautabkochung violett färbt und sie nun in einem U-förmig gestalteten Gefäfs (Fig. 176) der Elektrolyse unterwirft. Die Flüssigkeit wird alsdann am positiven Pol durch die Säure rot, am negativen durch die Lauge grün gefärbt.

Wenn das in dem gelösten Salz enthaltene Metall in Berührung mit Wasser bestehen kann, ohne letzteres zu zersetzen, so entwickelt sich am negativen Pol kein Wasserstoffgas, sondern das Metall selbst lagert sich auf der Polplatte ab. Dies geschieht z. B., wenn man den galvanischen Strom durch eine Lösung von Kupfervitriol (schwefelsaurem Kupfer, $Cu\,SO_4$) leitet; die Kathode bedeckt sich mit einem zusammenhängenden Überzug von metallischem Kupfer; an der Anode dagegen erscheinen freie Schwefelsäure und Sauerstoffgas. Macht man die Anode aus Kupfer, so ergänzt sich der hier ausgeschiedene Schwefelsäurerest durch Aufnahme von Kupfer zu Kupfervitriol, und es findet keine Wasserzersetzung und demnach auch keine Sauerstoffentwickelung statt; es wird nur Kupfer an der Anode aufgelöst und gleichzeitig ebenso viel auf der Kathode abgelagert. Will man derartige Einwirkungen der ausgeschiedenen Bestandteile auf die Polplatten vermeiden, so macht man sie, wie bei den beschriebenen Zersetzungsapparaten, aus Platin, weil dieses Metall chemischen Angriffen am wenigsten ausgesetzt ist.

Manche Metalle, z. B. Silber und Blei, scheiden sich krystallinisch aus. Man kann den Vorgang der Ausscheidung vielen Zuschauern zugleich sichtbar machen, wenn man ein Bild der mit parallelen Glaswänden versehenen Zersetzungszelle, welche eine Lösung von essigsaurem Blei und zwei Bleielektroden enthält, mittels einer Linse auf einen Schirm projizirt. An der Kathode erscheinen die Bleikryställchen in baumförmigen Wucherungen (Bleibaum, arbor saturni), welche, wenn man den Strom umkehrt, sich wieder auflösen und an der anderen Elektrode erscheinen.

Die Alkalien und Erden hatten für unzerlegbar gegolten, bis Davy 1807 aus feuchtem Ätzkali (Kaliumhydroxyd, $KHO$) das Kaliummetall in silberglänzenden Kügelchen gewann; $2\,KHO$ geben $K_2 + H_2O + O$.

Geschmolzene Metallchloride liefern Chlor an der Anode, an der Kathode das Metall. Magnesium und namentlich Aluminium werden im grofsen fabrikmäfsig durch Elektrolyse dargestellt.

Setzt man die Poldrähte einer Batterie auf ein mit Jodkaliumlösung und Stärkekleister befeuchtetes Papier, so entsteht am positiven Pol ein blauer Fleck, indem das hier abgeschiedene Jod den Kleister blau färbt. Man kann sich daher eines solchen Papieres bedienen, um die Pole zu unterscheiden. In den Handel wird unter dem Namen Polreagenspapier ein Papier gebracht, das mit einer Salzlösung getränkt ist, der ein wenig Phenolphthalein zugesetzt ist. Unter dem negativen Pol entsteht hier ein roter Fleck.

Die schon lange vor der Entdeckung Galvanis von Sulzer (1760) gemachte Beobachtung, dafs zwei Stücke verschiedener Metalle (Kupfer

und Eisen) miteinander in Berührung gebracht und mit den freien Enden auf und unter die Zunge gelegt eigentümliche Geschmacksempfindungen hervorrufen, beruht auf Elektrolyse. Man kann in der That die Natur der Pole durch den Geschmack erkennen; der positive Pol auf die Zunge gebracht schmeckt sauer, der negative laugenhaft.

208. **Elektrolytische und metallische Leitung.** Eine Flüssigkeit leitet hiernach den elektrischen Strom auf ganz andere Weise als ein Metall; während ein metallischer Leiter beim Durchgang des Stromes keine chemische Veränderung erfährt, leitet eine Flüssigkeit (wenn sie nicht selbst ein Metall ist, wie das Quecksilber) den Strom nur, indem sie chemisch zersetzt wird; Flüssigkeiten, welche durch den Strom nicht zersetzt werden, leiten ihn auch nicht, wie z. B. reines Wasser, Alkohol, Petroleum, Schwefelkohlenstoff. Die Unterscheidung Voltas zwischen Leitern erster und zweiter Klasse ist daher wohlbegründet; jene umfassen die Metalle und Kohle, diese die Elektrolyte.

Die chemische Zersetzung des Elektrolyten vollzieht sich aber nicht innerhalb desselben, sondern an den Elektroden. Die Bestandteile des Elektrolyten wandern also in der Flüssigkeit nach entgegengesetzten Richtungen, das Kation nach der Kathode, das Anion nach der Anode, und scheiden sich an den Elektroden ab. Die Bewegung der Elektricitäten ist also bei den elektrolytisch leitenden Körpern verknüpft mit einer Bewegung der Materie.

209. **Faradays elektrolytische Gesetze.** Werden in denselben Stromkreis hintereinander mehrere Wasserzersetzungsapparate (wie Fig. 175) eingeschaltet, so entwickelt sich in allen die gleiche Menge Wasserstoff, auch wenn die Apparate hinsichtlich ihres Fassungsraumes sowie der Gestalt, Gröſse und Entfernung der Elektroden noch so verschieden sind, und einzeln angewendet in derselben Zeit verschiedene Mengen liefern. Ein und derselbe Strom zersetzt also während derselben Zeit immer die nämliche Menge Wasser (Faraday, 1833).

Schaltet man in denselben Stromkreis hintereinander mehrere Zersetzungsgefäſse mit verschiedenen Elektrolyten, z. B. mit Schwefelsäure angesäuertes Wasser, Chlorwasserstoffsäure, Chlorblei und Kupfersulfat, so erhält man im ersten Gefäſs 2 Gewichtsteile Wasserstoff und 16 Gewichtsteile Sauerstoff, im zweiten 2 Gewichtsteile Wasserstoff und 71 Chlor, im dritten 207 Blei und 71 Chlor, im vierten 63 Kupfer und 16 Sauerstoff. Oder werden drei Zersetzungsapparate mit Salzsäure ($HCl$), Wasser ($H_2O$) und Ammoniakflüssigkeit ($H_3N$) eingeschaltet, so entwickelt sich in allen dreien ein gleichgroſses Volumen Wasserstoffgas und daneben im ersten ein gleiches Volumen Chlorgas, im zweiten ein halb so groſses Volumen Sauerstoffgas und im dritten ein drittel so groſses Volumen Stickstoffgas. Durch ein und denselben Strom werden demnach aus verschiedenen Elektrolyten die Bestandteile genau in jenen Mengenverhältnissen ausgeschieden, in welchen sie sich miteinander chemisch verbinden und sich gegenseitig vertreten können, oder die in demselben Stromkreis aus-

geschiedenen Gewichtsmengen verhalten sich wie die chemischen Äquivalente (Verbindungsgewichte). Man kann auch sagen, daſs die nämliche Elektricitätsmenge notwendig und hinreichend ist, um ein Äquivalent eines jeden beliebigen Zersetzungsproduktes abzuscheiden. Dieses von Faraday (1833) entdeckte Gesetz heiſst „das Gesetz der festen elektrolytischen Aktion".

Teilt man den Schlieſsungsdraht einer Batterie im Punkte $A$ (Fig. 177) in zwei genau gleiche Zweige, die sich im Punkte $B$ wieder vereinigen, und schaltet man von drei vollkommen gleichen Wasserzersetzungsapparaten $M$, $M_1$, $M_2$ den einen in den unverzweigten Stromteil, die beiden anderen in die Zweige, so ist klar, daſs durch $M_1$ und $M_2$ je nur die Hälfte der Elektricitätsmenge flieſst wie durch $M$, oder daſs dort die Stärke des Stromes nur die Hälfte ist von derjenigen in $M$. Es zeigt sich alsdann, daſs die in $M_1$ und $M_2$ entwickelten Gasmengen unter sich gleich sind und jede nur die Hälfte ist von der in $M$ entwickelten Gasmenge. Hieraus folgt, daſs die in derselben Zeit zersetzten Mengen eines Elektrolyts der Stromstärke proportional sind.

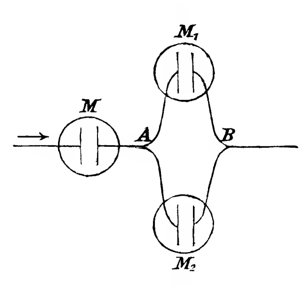


Fig. 177.
Versuch von Faraday.

210. **Theorie der Elektrolyse.** Die beschriebenen Thatsachen der Elektrolyse finden ihren einfachsten zusammenfassenden Ausdruck in der Vorstellung, daſs in dem Elektrolyten die Bewegung der Elektricität durch die Bewegung der materiellen Teilchen vermittelt wird, daſs die Ionen, die in den Elektrolyten nach entgegengesetzten Richtungen wandern, elektrische Ladungen mit sich führen, die sie bei ihrer Abscheidung an die Elektroden abgeben. Der elektrische Strom in dem Elektrolyten ist also ein „Konvektionsstrom". Bei der Schwefelsäure, dem Glaubersalz, dem Kupfervitriol führen der Wasserstoff, Natrium, Kupfer, die nach der Kathode wandern, positive Ladung mit sich, der Schwefelsäure-Rest ($SO_4$), der nach der Anode wandert, negative Ladung. Diese Ladungen sind nicht bloſs für die entgegengesetzten Bestandteile eines und desselben Elektrolyten entgegengesetzt gleich groſs, sondern sie sind nach dem 2. Faradayschen Gesetz auch für verschiedene Elektrolyten gleich groſs; zwei Atome Wasserstoff führen so viel Elektricität mit sich wie zwei Atome Natrium oder ein Atom Kupfer. In den chemischen Verbindungen vertritt ein Atom Kupfer zwei Atome Wasserstoff; man nennt deswegen Kupfer zweiwertig gegenüber dem einwertigen Wasserstoff, oder sagt, daſs Kupfer zwei Valenzen, Wasserstoff, Natrium nur eine Valenz habe. Dann kann man die obigen Thatsachen auch so aussprechen: **an jeder freien Valenz eines Iones haftet die gleiche Menge Elektricität.**

Ursprünglich nahm man an, daſs der Strom die Spaltung des

Elektrolyten in diese entgegengesetzt geladenen Bestandteile bewirke. Da aber schon die geringste elektromotorische Kraft Zersetzung hervorruft, so machte Clausius (1857) die Annahme, dafs die Bestandteile des Elektrolyten sich in einem Zustande beständigen Zerfallens und Wiedervereinigens befänden, und dafs die elektrische Kraft nur auf diejenigen Teilchen wirkte, die aus dem Molekularverbande gelöst wären. Diese Anschauung ist in neuester Zeit noch weiter ausgebildet worden. Die elektrolytischen Flüssigkeiten sind Lösungen und besitzen eine Reihe von Eigenschaften (osmotische Steighöhe, Dampfdruckerniedrigung, Gefrierpunktserniedrigung, Siedepunktserhöhung), die wir als Folgen des osmotischen Drucks des gelösten Stoffs auffassen oder mit ihm in Zusammenhang bringen können. Die Untersuchung dieser Eigenschaften hat nun für die Elektrolyte zu der merkwürdigen Erfahrung geführt, dafs bei ihnen der osmotische Druck immer gröfser ist, als er nach Konzentration und Molekulargewicht (vgl. 88) sein sollte. Dieser Umstand deutet darauf hin, dafs die Zahl der Teilchen, von der ja nach der kinetischen Auffassung, die Gröfse des Drucks abhängt, in dem Elektrolyten gröfser ist, als z. B. in einer äquimolekularen Zuckerlösung, uud diese Vergröfserung der Zahl der Teilchen läfst sich in einfacher Weise darauf zurückführen, dafs die Moleküle des gelösten Stoffs sich zum Teil in zwei unabhängig voneinander wirkende Bestandteile gespalten oder dissociirt haben. Man hat ferner gefunden, dafs die Fähigkeit der Elektrolyte, den galvanischen Strom zu leiten, mit ihrem von den Gesetzen der gewöhnlichen Lösungen abweichenden Verhalten parallel geht und um so gröfser ist, je mehr dissociirte Moleküle in der Lösung vorhanden sind. Die dissociirten Moleküle vermitteln also die Stromleitung oder den Transport der Elektricitäten; daher kommt man zu der Vorstellung, dafs in den Elektrolyten der gelöste Stoff nicht in zwei neutrale, sondern in zwei entgegengesetzt elektrisch geladene Bestandteile, oder in Ionen gespalten sei. (Elektrolytische Dissociation, Arrhenius 1888.)

Die Ionen sind in den Elektrolyten vollkommen frei beweglich zu denken. Indem an jeder Stelle gleich viel positive und negative Ionen vorhanden sind, herrscht überall der neutrale elektrische Zustand. Taucht man nun die Polplatten einer galvanischen Batterie in die Flüssigkeit, so zieht die positiv geladene Anode die negativen Ionen an und stöfst die positiven ab; ebenso zieht die negativ geladene Kathode die positiven Ionen an und stöfst die negativen ab. Durch diese Kräfte werden die Ionen in Bewegung gesetzt, die positiven Ionen nach der Kathode, die negativen Ionen nach der Anode zu. An den Elektroden kehren die Ionen in den neutralen Zustand zurück, indem sie ihre Ladungen abgeben. Diese an die Elektroden überführten Elektricitätsmengen aber werden andauernd durch die von der Batterie gelieferten entgegengesetzten Elektricitäten ausgeglichen, wodurch der gesamte Bewegungszustand andauernd erhalten wird. Die Bewegungen der Ionen vollziehen sich unter den sehr

grofsen Hindernissen, die aus der hemmenden (Reibungs-) Wirkung des umgebenden Mittels entspringen. Die Geschwindigkeit der Ionenbewegung nach der Anode oder Kathode zu ist daher aufserordentlich klein; sie ist der treibenden Kraft proportional, und wächst daher mit der elektromotorischen Kraft der angewandten Batterie. Da die Dimensionen der Ionen verschieden sind, so sind es auch die Reibungshindernisse, die sie finden. Daher wandern die Ionen mit verschiedenen Geschwindigkeiten, was besondere Verschiebungen der Konzentration der Elektrolyten während der Elektrolyse zur Folge hat (Überführungszahlen. Hittorf, 1853, F. Kohlenrausch, 1879).

211. **Voltameter.** Da nach Faradays Gesetzen die Stromstärke der in bestimmter Zeit zersetzten Menge eines Elektrolyts proportional ist, so kann durch Ermittelung dieser Menge die Stromstärke gemessen werden. Man nennt die hierzu bestimmten Apparate Voltameter. Das gebräuchlichste derselben ist das Knallgasvoltameter (Fig. 178). Durch den luftdicht schliefsenden Kork eines Glasgefäfses gehen zwei isolirte Drähte, welche als Elektroden Platinplatten tragen; das Gefäfs wird mit durch Schwefelsäure angesäuertem Wasser gefüllt. Die an den Plattinplatten sich entwickelnden Gase, 1 Raumteil Sauerstoff und 2 Raumteile Wasserstoff, mischen sich im oberen Teil des Gefäfses zu Knallgas; letzteres entweicht durch ein luftdicht durch den Kork gestecktes gebogenes Gasentwickelungsrohr, und wird in einer graduirten Glasröhre über Wasser aufgefangen (93). Mit dem Voltameter läfst sich leicht nachweisen, dafs die Stromstärke an allen Stellen eines Stromkreises die nämliche ist; denn an welcher Stelle man es auch in denselben einschalten mag, überall liefert es in gleicher Zeit die gleiche Menge Knallgas.

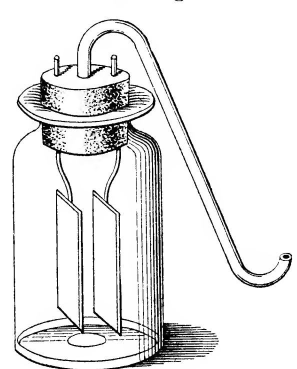


Fig. 178.
Knallgas-Voltameter.

Statt durch Wasser kann man den zu messenden Strom auch durch eine Lösung von schwefelsaurem Kupfer (Kupfervoltameter oder salpetersaurem Silber (Silbervoltameter) leiten und die Menge des am negativen Pol abgeschiedenen Metalles durch Wägung bestimmen. Da derselbe Strom in gleicher Zeit von verschiedenen Elektrolyten äquivalente Mengen zerlegt, so läfst sich hieraus die entsprechende Knallgasmenge, falls man sie zu wissen wünscht, leicht berechnen. Das Kupfer- und besonders das Silbervoltameter liefern genauere Ergebnisse als das Knallgasvoltameter.

Als Einheit für die auf solche Weise zu messenden Stromstärken hat man durch internationales Übereinkommen diejenige Stromstärke festgesetzt, welche in einer Sekunde 1,118 mg, oder in einer Minute 67,08 mg, oder in einer Stunde 4,025 g Silber abscheidet, und hat dieser Einheit den Namen Ampère beigelegt.

Die Wahl dieser Grösse zur Einheit des Strommasses ist durch Überlegungen bedingt gewesen, die wir an einer anderen Stelle kennen lernen werden (246).

Man nennt die durch die Stromeinheit (1 Ampère) in der Zeiteinheit (1 sec) abgeschiedene Menge eines Ions dessen elektrochemisches Äquivalent; dasjenige des Silbers ist 1,118 mg. Die Elektricitätsmenge, welche sich mit 1,118 mg Silber oder dem äquivalenten Gewicht eines anderen Ions in Elektrolyten bewegt, gilt demzufolge als Einheit der Elektricitätsmenge unter der Benennung Coulomb.

212. **Galvanoplastik.** Jacobi in Dorpat machte 1837 die Beobachtung, dafs der auf der negativen Polplatte bei der Elektrolyse von Kupfervitriollösung sich absetzende Kupferüberzug leicht abgelöst werden kann, und die etwaigen Unebenheiten jener Platte in getreuestem Abdruck wiedergibt. Er gründete darauf ein Verfahren, Medaillen, gravirte Platten und andere plastische Gegenstände in galvanisch abgeschiedenem Kupfer nachzubilden, und nannte dasselbe Galvanoplastik. Um eine galvanoplastische Nachbildung einer Medaille oder irgend eines anderen geeigneten Kunstgegenstandes zu erhalten, fertigt man zuerst einen Abdruck des Gegenstandes in Wachs, Stearin, Guttapercha, Gips o. dergl., macht diese Form durch Bepinseln mit feinem Graphitpulver auf ihrer Oberfläche leitend, bringt sie, mit dem negativen Pol einer galvanischen Batterie oder einer anderen geeigneten Stromquelle verbunden, in das Kupferbad und stellt ihr als Anode eine Kupferplatte gegenüber, die in demselben Mafs, in welchem Kupfer an der Form ausgeschieden wird, sich auflöst und dadurch die Kupferlösung immer konzentrirt erhält.

Auf ganz reinen Metallflächen haften galvanisch niedergeschlagene Metalle sehr fest. Hierauf beruht das „Galvanostegie“ genannte Verfahren, Gegenstände aus minderwertigen Metallen mit einem dünnen aber festhaftenden Überzug eines kostbareren Metalls (galvanische Versilberung, Vergoldung, Vernickelung etc.) zu versehen, indem man den Gegenstand, mit der Kathode verbunden, in eine geeignete Lösung des abzuscheidenden Metalls bringt, und als Anode eine Platte desselben Metalls gegenüberstellt.

213. **Ablenkung der Magnetnadel.** Oerstedt entdeckte im Jahre 1820, dafs eine in der Nähe eines vom Strom durchflossenen Leiters drehbar aufgestellte Magnetnadel aus ihrer Gleichgewichtslage im magnetischen Meridian, welche sie infolge der magnetischen Einwirkung der Erde annimmt, abgelenkt wird, und sich in eine neue Gleichgewichtslage einstellt. Vom Stromleiter aus wirkt also auf die Nadel ein Kräftepaar, durch welches sie so lange gedreht wird, bis demselben das vom Erdmagnetismus herrührende Kräftepaar das Gleichgewicht hält. Kompensirt man die Wirkung der Erde durch einen genäherten Magnet, d. h. macht man die Nadel astatisch (138), so stellt sie sich rechtwinklig zu einem geradlinigen Stromleiter, der über oder unter ihr horizontal verläuft. Der Strom sucht also die

Nadel senkrecht zu seiner Richtung zu stellen, oder das vom Strom auf die Nadel ausgeübte Kräftepaar steht senkrecht auf der durch den Strom und den Drehpunkt der Nadel gelegten Ebene.

Umgekehrt wird ein beweglich aufgehängter Stromleiter von einem festliegenden Magnet abgelenkt und sucht sich senkrecht zu dessen magnetischer Achse zu stellen (Gleichheit von Wirkung und Gegenwirkung).

214. **Ampèresche Regel.** Um die Richtung, nach welcher die Ablenkung erfolgt, zu bestimmen, hat Ampère folgende praktische Regel angegeben: man denke sich in dem Stromleiter eine kleine menschliche Figur, den Kopf voran und das Gesicht der Nadel zugewendet, mit dem Strome schwimmend, so wird der Nordpol der Nadel stets nach der linken Seite der Figur abgelenkt.

Ist der Leitungsdraht in der durch die Nadel gelegt gedachten lotrechten Ebene um die Nadel herumgebogen, so ergibt sich aus dieser Regel, daſs alle Teile dieses Stromkreises die Nadel im gleichen Sinne abzulenken streben, und zwar so, daſs ihr Südpol nach der Seite hin abgelenkt wird, von welcher aus betrachtet der Strom die Nadel in der Richtung des Uhrzeigers umkreist.

215. **Galvanoskop.** Ein an seinen Enden mit Klemmschrauben versehener Kupferstreifen, der um eine auf einer Spitze schwebende Magnetnadel herumgebogen ist, kann daher dazu dienen, nicht bloſs aus der Ablenkung der Nadel das Dasein, sondern auch aus dem Sinne der Ablenkung die Richtung eines Stromes, in dessen Schlieſsungskreise dieses Galvanoskop eingeschaltet wird, zu erkennen.

216. **Galvanometer. Multiplikator.** Die Kraft, mit welcher der Strom die Magnetnadel abzulenken strebt, ist der Stromstärke proportional. Denn hängt man über einem im magnetischen Meridian horizontal ausgespannten Leitungsdraht eine Magnetnadel an einem

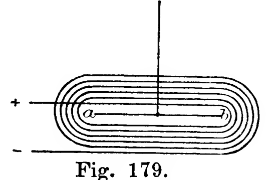


Fig. 179.
Multiplikator mit einfacher Nadel.

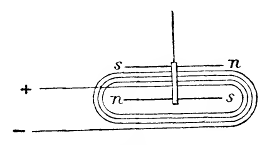


Fig. 180.
Multiplikator mit astatischer Nadel.

oben mit Torsionskreis versehenen Drahte auf, so ist der Drehungswinkel, um welchen man diesen Draht drillen muſs, um die abgelenkte Nadel wieder in ihre ursprüngliche Lage zurückzuführen, der Menge Knallgas proportional, welche in einem gleichzeitig in den Strom eingeschalteten Voltameter entwickelt wird.

Durch Beobachtung der Ablenkung der Magnetnadel können daher Stromstärken miteinander verglichen und somit gemessen werden. Apparate, welche zu derartigen Messungen bestimmt sind, heiſsen Galvanometer.

Handelt es sich um geringe Stromstärken, so wird der Leitungsdraht, um die Wirkung des Stromes auf die Magnetnadel zu vergröſsern, in zahlreichen Windungen, welche durch Umspinnung mit Seide oder sonstwie voneinander isolirt sind, um die Nadel herumgeführt (Fig. 179). Da alle Windungen in gleichem Sinne auf die Nadel wirken und demnach die ablenkende Kraft im Verhältnis der Anzahl der Windungen vervielfacht (multiplizirt) wird, nennt man eine solche Vorrichtung Multiplikator (Schweigger, Poggendorff, 1821). Die Magnetnadel ist leicht beweglich an einem Coconfaden aufgehängt.

Um noch gröſsere Empfindlichkeit zu erreichen, wendet man ein astatisches Nadelpaar (Nobili, 1825) an (Fig. 180), nämlich zwei durch ein Stäbchen miteinander fest verbundene und mit den gleichnamigen Polen nach entgegengesetzten Seiten gewendete Magnetnadeln *ns* und *sn* (vgl. 138), deren eine innerhalb, die andere auſserhalb des Multiplikatorrahmens schwebt. Sind die Nadeln nahezu gleich stark magnetisch, so hebt sich die Wirkung des Erdmagnetismus, der jede Nadel mit ihrem Nordpol nach Norden zu richten strebt, auf das vereinte Paar nahezu auf. Das Nadelpaar wird also nur durch eine sehr geringe Kraft im magnetischen Meridian festgehalten, und kann daher schon durch einen sehr schwachen Strom aus dieser Richtung abgelenkt werden, um so mehr, als der in den Windungen des Multiplikators kreisende Strom nach der

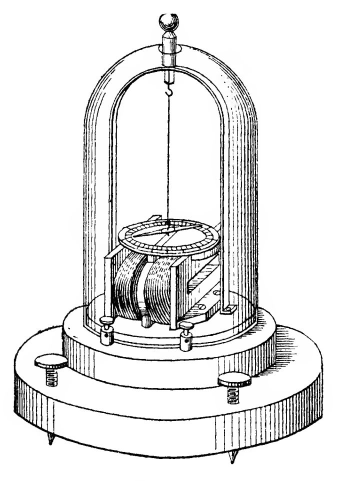


Fig. 181.
Astatisches Galvanometer.

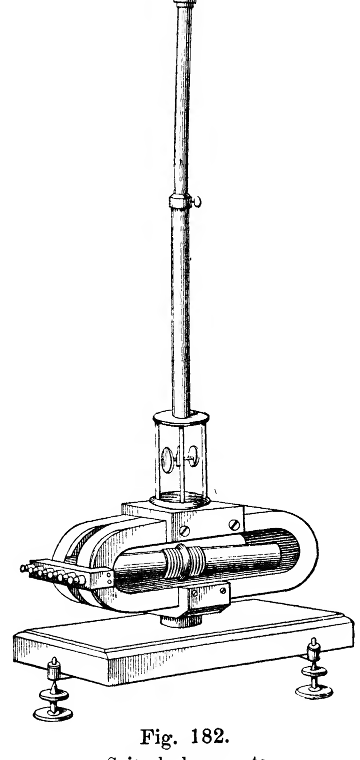


Fig. 182.
Spiegelgalvanomoter.

Ampèreschen Regel auf beide Nadeln im gleichen Sinne wirkt. Die Fig. 181 zeigt ein solches Galvanometer mit astatischem Nadelpaar; die untere Nadel schwebt verborgen in der Höhlung eines Holzrähmchens, auf welches die Windungen des Multiplikatordrahtes gewickelt sind, die obere spielt über einem in Grade eingeteilten Kreis, an welchem man den Ablenkungswinkel abliest. Um störende Luftströmungen abzuhalten, ist eine Glasglocke über das Instrument gestülpt, vor welcher zwei Klemmschrauben sichtbar sind, die mit den Drahtenden des Multiplikators verbunden sind, und zur Aufnahme der Zuleitungsdrähte dienen.

Der Ablenkungswinkel gibt nun aber keineswegs unmittelbar ein Mafs für die Stromstärke; denn die ablenkende Kraft, obwohl bei gleichbleibender Stellung der Nadel der Stromstärke proportional, ändert sich, wenn die Nadel ihre Lage zum Stromkreis ändert, und ist daher vom Ablenkungswinkel selbst abhängig, und zwar je nach der Konstruktion des Instruments in verschiedener Weise. Da jedoch jeder Stromstärke eine bestimmte Ablenkung entspricht, so kann man durch Versuche mit bekannten Stromstärken für jedes Galvanometer eine Tabelle entwerfen, aus welcher sich für jeden beobachteten Ablenkungswinkel die zugehörige Stromstärke entnehmen läfst.

Für praktische Zwecke sehr bequem sind Instrumente, bei denen der Teilkreis, auf dem der Zeiger spielt, nicht in Grade geteilt ist, sondern unmittelbar die Stromstärken angibt, die die betreffende Ablenkung der Nadel bewirken. Man bezeichnet sie als Milli-Ampèremeter, wenn sie die Stromstärken in Tausendsteln eines Ampères abzulesen gestatten.

217. **Spiegelgalvanometer.** Eine noch gröfsere Empfindlichkeit erreicht man mit den Spiegelgalvanometern. Bei diesem ist über dem Magnet und fest mit ihm verbunden ein kleiner Spiegel angebracht, der, wie beim Magnetometer (143) die Ablenkung durch Fernrohr und Skala zu messen gestattet. Fig. 182 zeigt eine Ausführungsform eines derartigen Instrumentes. Bei ihm schwebt der Magnetstab in einer dicken Kupferhülse; auf diese ist der Multiplikatordraht in mehreren voneinander getrennten Lagen aufgewickelt, welche man vermittelst der links sichtbaren Klemmschrauben in verschiedener Weise unter sich und mit den Zuleitungsdrähten verbinden kann. Die Kupferhülse hat den Zweck, die Schwingungen des Magnetstabes zu beruhigen (Dämpfung, 278). Da letztere Wirkung um so kräftiger ist, je enger der Magnet von der Kupfermasse umschlossen ist, so hat G. Wiedemann dem Magneten die Gestalt eines leichten Stahlringes gegeben, der in dem Hohlraum eines dicken Kupfercylinders schwingt (Fig. 183a). Über diesen werden von beiden Seiten die kreisförmig gestalteten Spulen geschoben. Doch können die Spulen auch auf einer Schlittenvorrichtung von dem Magnet abgerückt werden, um die Empfindlichkeit des Instrumentes zu vermindern. Eine andere häufig benutzte Form des Magnets im Galvanometer mit Kupferdämpfung ist der von

W. Siemens angegebene Glockenmagnet (Fig. 183b), der in dem cylindrischen Hohlraum einer Kupferkugel hängt.

Will man bei diesen Instrumenten eine Steigerung der Empfindlichkeit durch Abschwächung der Richtkraft des erdmagnetischen Feldes herbeiführen, so kann man dies erreichen, indem man neben, über oder unter dem Instrument einen gröſseren Magnetstab in solche Lage und Entfernung anbringt, daſs seine Wirkung auf die Nadel derjenigen des Erdmagnetismus entgegengerichtet ist (137). (Astasirungsmagnet, Hauy'scher Stab.)

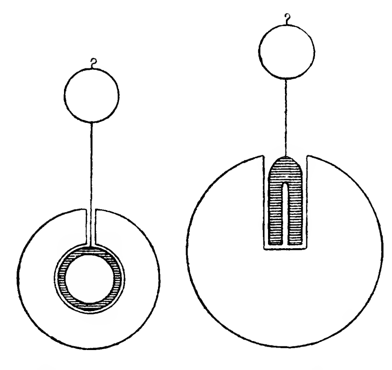


Fig. 183a. Ringmagnet mit Kupferdämpfung. Fig. 183b. Glockenmagnet

Aber man kann auch bei den Spiegelgalvanometern eine Verbindung von zwei entgegengesetzt gerichteten Magneten, ein astatisches Nadelpaar benutzen. Bei der Konstruktion von Sir W. Thomson ist jeder der beiden Magnete von einer besonderen Spule umgeben, und der Strom wird durch die beiden Spulen in entgegengesetzter Richtung geleitet, wodurch eine Verdoppelung der Wirkung erreicht wird.

Mit derartigen hochempfindlichen Instrumenten kann man Ströme messen von der Gröſsenordnung eines tausendmilliontel Ampère. Dabei sind für die Spiegelgalvanometer die Ausschläge der Stromstärke sehr nahe proportional, weil die Ablenkungswinkel der Nadel bei diesen Instrumenten ja immer nur sehr gering sind.

218. **Tangentenbussole** (Pouillet, 1843). Gibt man dem Stromleiter die Gestalt eines kreisförmigen Ringes in vertikaler Ebene (Fig. 184), und macht man die in seinem Mittelpunkt in horizontaler Ebene drehbare Magnetnadel so klein, daſs ihre verschiedenen Stellungen in Bezug auf den Stromkreis nicht in Betracht kommen, so ist die ablenkende Kraft, welche zur Ebene des Kreises senkrecht steht, wiederum nur von der Stromstärke abhängig und derselben proportional. Der Ring kann in seinem Fuſsgestell so gedreht werden, daſs seine Ebene mit der Ruhelage der Magnetnadel (d. i. mit dem magnetischen Meridian) zusammenfällt; er wird während der Beobachtung in dieser Stellung belassen, und der Ablenkungswinkel $a$ an einer Kreisteilung abgelesen, in deren Mitte die Magnetnadel schwebt. Die ablenkende Kraft des Stromes $kJ$ (Fig. 185) steht in diesem Falle senkrecht zur Ebene des Ringes, d. i. senkrecht zum magnetischen Meridian; ihre zur Nadel senkrechte Komponente $kJ \cos \alpha$ hält der ebenfalls zur Nadel senkrechten Komponente $M \sin \alpha$ der ablenkenden Kraft des Erdmagnetismus das Gleichgewicht; es ist daher $kJ \cos \alpha = M \sin \alpha$ oder $J = K \operatorname{tg} \alpha$, d. h. die Stromstärke ist

der Tangente des Ablenkungswinkels proportional, weshalb das Instrument Tangentenbussole heifst. Da der Kreis ziemlich weit von der Magnetnadel entfernt ist (man gibt ihm einen Radius von mindestens 0,2 m), so kann die Tangentenbussole nur bei stärkeren Strömen angewendet werden.

Schaltet man in einen und denselben Stromkreis mehrere Sinus- oder Tangentenbussolen hintereinander, so werden dieselben im allgemeinen verschiedene Ablenkungen zeigen; denn der Ausschlag der Nadel ist ja bei jedem Instrument von der individuellen Gestaltung des Stromleiters, sowie von der örtlichen Stärke des Magnetfeldes

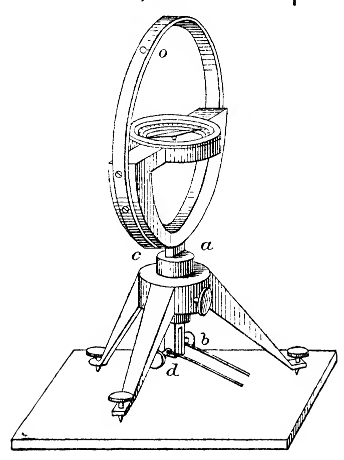



Fig. 184.
Tangentenbussole.

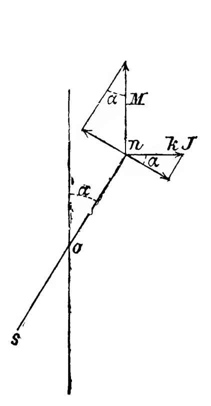



Fig. 185.
Zur Tangentenbussole.

der Erde abhängig. Ein Voltameter dagegen, wie es auch beschaffen sein mag, liefert für dieselbe Stromstärke in gleicher Zeit immer dieselbe Gasmenge. Man kann nun eine Tangentenbussole aichen, wenn man sie gleichzeitig mit einem Voltameter in eine Stromleitung einschaltet, und an jener den Ausschlag $\alpha$ abliest, an diesem die Stromstärke $J$ in Ampère ermittelt. Aus der Gleichung $J = K \operatorname{tg} \alpha$, in welcher jetzt $J$ und $\alpha$ bekannt sind, läfst sich alsdann leicht der „Reduktionsfaktor“ $K$ (vgl. 246) der Tangentenbussole bestimmen, so dafs sich nun auch bei alleiniger Anwendung des Instruments die Stromstärke sofort und auf bequemere Weise als mit dem Voltameter in Ampère ausgedrückt ergibt.

219. **Galvanische Polarisation.** Leitet man den Strom einer galvanischen Batterie mittels zweier mit den Poldrähten verbundener Platinplatten durch verdünnte Schwefelsäure (z. B. durch ein Voltameter oder einen anderen Wasserzersetzungsapparat), so dafs sich an der negativen Polplatte Wasserstoffgas, an der positiven Sauerstoffgas abscheidet, unterbricht sodann den Strom und setzt die beiden Platinplatten unter sich durch einen Schliefsungsbogen in leitende Ver-

bindung, so zeigt ein in diesen Schliefsungsbogen eingeschaltetes Galvanometer einen elektrischen Strom an, welcher dem ursprünglich durchgeleiteten Strom entgegengesetzt gerichtet ist (Ritter, 1803).

Während dieses Vorganges verhält sich also der Zersetzungsapparat wie ein galvanisches Element, in welchem die beiden mit Wasserstoff und Sauerstoff beladenen Platinplatten die Rolle des negativen und des positiven Metalles spielen. Um diesen ihren Gegensatz zu bezeichnen, nennt man die Platten polarisirt. Man bezeichnet die elektromotorische Kraft, welche sie infolge ihrer Gasbedeckung gegeneinander besitzen, als die elektromotorische Gegenkraft der Polarisation und den Strom, zu welchem diese Anlafs gibt, sobald die ladende Batterie aus dem Stromkreise entfernt wird, als den Polarisationsstrom.

220. **Sekundärelement. Accumulator.** Die polarisirten Platinplatten geben nur einen sehr kurz dauernden Polarisationsstrom; denn die aufgenommenen Gase werden durch den umgekehrt fliefsenden Strom wieder in die Lösung übergeführt und die Platten verlieren schnell ihren polarisirten Zustand, weil sie gröfsere Gasmengen aufzunehmen nicht imstande sind. Verwendet man dagegen Blei statt Platin, so kann man länger andauernde Polarisationsströme erhalten. Taucht man zwei Bleiplatten in verdünnte Schwefelsäure und schickt den Strom einer Batterie von mehreren Bunsenschen Elementen durch sie hindurch, so findet man nach einiger Zeit die mit dem positiven Pol der Batterie verbundene Platte mit einem braunen Überzuge bedeckt, während die mit dem negativen Pol verbundene Platte keine merkliche Änderung zeigt. In diesem Falle haben die elektrolytischen Zersetzungsprodukte chemisch auf die Platten eingewirkt. Das schwefelsaure Blei, mit dem sich die Bleiplatten in Berührung mit der Schwefelsäure oberflächlich bedecken, ist an der Anode durch den sich dort abscheidenden Schwefelsäurerest in Schwefelsäure und Bleisuperoxyd verwandelt worden (nach der Gleichung: $PbSO_4 + SO_4 + 2H_2O = 2H_2SO_4 + PbO_2$). Erstere geht in die Lösung, letztere haftet auf der Platte als brauner Überzug An der Kathode dagegen hat sich durch den hier abgeschiedenen Wasserstoff das schwefelsaure Blei zu reinem Blei reducirt, während ebenfalls Schwefelsäure in Lösung geht. In diesem Zustande sind die Platten „geladen“ und sind nun imstande, einen längere Zeit andauernden schwachen, oder kürzeren starken Strom zu liefern, der die umgekehrte Richtung hat, wie der Ladungsstrom, also von der Bleisuperoxydplatte durch den Schliefsungskreis nach der Bleiplatte verläuft. Sie behalten diese Fähigkeit auch lange Zeit, wenn kein Strom aus ihnen entnommen wird. Bei Stromentnahme aber werden die beschriebenen chemischen Veränderungen wieder rückgängig gemacht; die Platten kehren in den ursprünglichen Zustand zurück, sie entladen sich und verlieren damit ihre stromerzeugende Wirkung. Indem man dann abermals einen Strom durch sie hindurchschickt, können sie von neuem zur Stromerzeugung umgeformt,

„aufgeladen“ werden. Planté war der erste (1860), der ein solches Ladungs- oder sekundäres Element als Ersatz der gewöhnlichen (primären) galvanischen Elemente konstruirte. In neuerer Zeit hat sich für diese Elemente der Name Accumulator eingebürgert, da die Stromarbeit der primären Batterie in ihnen zu späterer Verwendung gleichsam aufgespeichert wird. Da die Reducirung des Bleisuperoxyds nach elektrolytischen Gesetzen dem Entladungsstrom parallel geht, so wird die zu entladende Elektricitätsmenge eines Accumulators — seine Kapacität, die man in Ampèrestunden auszudrücken pflegt — um so gröfser sein, je mehr „aktive Masse“ auf den Platten vorhanden ist. Bei dem Plantéschen Element, in dem das Bleisuperoxyd elektrolytisch auf Platten aus reinem Blei erzeugt wurde, bedurfte es eines sehr langwierigen „Formirungsprocesses“, um eine dickere Schicht von Bleisuperoxyd zu erzeugen. Faure lehrte (1881) diesen Procefs dadurch abkürzen, dafs er statt der vollen Bleiplatten Bleigerippe anwandte und die Hohlräume derselben von vornherein mit aktiver Masse ausfüllte, und zwar für die positiven Platten mit Mennige ($Pb_3 O_4$) für die negativen mit Bleioxyd ($PbO$). Auf diesem Wege werden heutzutage die Accumulatoren fabrikmäfsig hergestellt. Für Entnahme starker Ströme werden die Accumulatoren aus einer gröfseren Zahl von positiven und negativen Platten zusammengesetzt, die in grofsen mit der Schwefelsäurelösung gefüllten Gefäfsen abwechselnd nebeneinander gestellt und so verbunden werden, dafs alle positiven Platten mit einer, alle negativen mit einer zweiten Bleileiste verlötet sind. Um höhere Spannungen zu erzielen, werden viele solcher Accumulatoren wie bei einer galvanischen Batterie hintereinander geschaltet (203). Nach dem oben Gesagten, geht bei der Ladung Schwefelsäure in Lösung, daher steigt während der Ladung das specifische Gewicht der Schwefelsäure im Accumulator, bei der Entladung sinkt es.

221. **Unpolisirbare Elektroden.** Die elektromotorische Gegenkraft der Polarisation in einer Zersetzungszelle wirkt nicht blofs nach dem Aufhören des primären Stromes, sondern ebenso während seiner Dauer, und schwächt denselben, indem sie die ursprüngliche elektromotorische Kraft um den Betrag der Gegenkraft vermindert; die polarisirte Zersetzungsquelle wirkt in dem Stromkreis wie ein entgegengeschaltetes galvanisches Element. Will man daher eine dauernde Wasserzersetzung erhalten, so mufs man eine elektromotorische Kraft anwenden, die gröfser ist als die Gegenkraft der Polarisation (ca. 2,5 Volt). Es kann jedoch die Polarisation in einer Zersetzungszelle auch vermieden werden, wenn man Elektroden und Elektrolyt so wählt, dafs beide beim Durchgang des Stromes unverändert bleiben; so z. B. bilden Zinkplatten in konzentrirter Zinksulfatlösung „unpolarisirbare Elektroden“, denn ebensoviel Zink, als an der Kathode niedergeschlagen wird, löst sich gleichzeitig unter Zurückbildung des zersetzten Zinksulfats an der Anode auf (Du Bois-Reymond, 1859).

222. **Konstante galvanische Elemente.** Da in einem geschlossenen galvanischen Plattenpaar die Flüssigkeit zersetzt wird, so macht sich auch hier im allgemeinen die Gegenkraft der Polarisation geltend. Während z. B. in dem Elemente Zink-Schwefelsäure-Platin die Bildung von Zinkionen an der Zinkplatte die Quelle der elektromotorischen Kraft ist, die in der Flüssigkeit einen elektrischen Strom in der Richtung von der Zink- zur Platinplatte in Bewegung setzt, ist gleichzeitig der an der Platinplatte abgeschiedene Wasserstoff vermöge seiner Neigung, wieder als Ion in Lösung zu gehen bestrebt, einen entgegengesetzten Polarisationsstrom hervorzurufen. Das Plattenpaar wird daher, bald nachdem es geschlossen worden, nur einen geschwächten Strom liefern, welcher dem Unterschied der sich entgegenwirkenden elektromotorischen Kräfte entspricht. Nur unmittelbar nach dem Eintauchen der Platten beobachtet man eine gröſsere Stromstärke, weil der in der Flüssigkeit absorbirte atmosphärische Sauerstoff sich mit dem freiwerdenden Wasserstoff sofort zu Wasser verbindet und dessen Ausscheidung und somit auch die Polarisation verhindert. Sobald dieser absorbirte Sauerstoff aufgezehrt ist, sinkt der Strom auf die jenem Unterschied entsprechende geringere Stärke herab und hört endlich ganz auf, wenn sich aus dem gebildeten Zinksulfat metallisches Zink auf der Platinplatte abzusetzen beginnt. Die Zusammenstellung Zink-Schwefelsäure-Platin ist daher ein unbeständiges (inkonstantes) Element, weil sein Strom die ursprüngliche Stärke nicht behält, sondern rasch abnimmt. Um diese durch die Polarisation bewirkte Abnahme möglichst zu vermeiden, braucht man nur dafür zu sorgen, daſs um die Platinplatte herum Sauerstoff verfügbar sei, welcher, indem er sich mit dem Wasserstoff zu Wasser verbindet, dessen Ausscheidung verhindert. Dies geschieht, indem man die Platinplatte nicht unmittelbar in die verdünnte Schwefelsäure stellt, sondern sie mit einer porösen Thonzelle umgibt, welche konzentrirte Salpetersäure enthält. Diese an Sauerstoff reiche Säure besitzt nämlich die Eigenschaft, einen Teil ihres Sauerstoffs an solche Stoffe, welche mit ihm in Verbindung zu treten geneigt sind (wie z. B. Wasserstoff) sehr leicht abzugeben. Die Zusammenstellung Zink in verdünnter Schwefelsäure, Platin in konzentrirter Salpetersäure bildet daher ein konstantes (beständiges) Element, in welchem der elektrolytisch ausgeschiedene Wasserstoff sofort wieder zu Wasser oxydirt und sonach die Polarisation vermieden wird. Dieses Grovesche Element liefert daher einen konstanten Strom, der seine ursprüngliche Stärke längere Zeit unverändert beibehält. In derselben Weise wirkt die Salpetersäure in dem Bunsenschen Element, welches sich von dem Groveschen Element dadurch unterscheidet, daſs Kohle die Stelle des Platins vertritt. In dem sehr konstanten Daniellschen Element (Zink in verdünnter Schwefelsäure, Kupfer in Kupfersulfatlösung) ist die Polarisation dadurch vermieden, daſs überhaupt kein Wasserstoff, sondern Kupfer abgeschieden wird, welches sich metallisch auf der Kupfer-

platte absetzt. Auch das Element von Latimer Clark (Quecksilber, Brei von Quecksilbersulfat und Zinksulfat, reines Zink) besitzt eine konstant bleibende elektromotorische Kraft.

Auch von dem Vorgange der Stromerzeugung in den galvanischen Elementen hat man sich in jüngster Zeit auf Grund der Vorstellungen der Ionentheorie (210) ein Bild zu machen gesucht. Wird Wasser zwischen Platinelektroden zersetzt, so bekundet die dabei auftretende Gegenkraft offenbar ein Bestreben der abgeschiedenen Gase in den Ionenzustand zurückzukehren. Sie folgen diesem Bestreben, sobald die treibende elektromotorische Kraft aus dem Stromkreise entfernt wird. Dann gehen positive $H$-Ionen von der Wasserstoff-Elektrode, negative $O$-Ionen von der Sauerstoff-Elektrode in Lösung; erstere Elektrode wird dadurch negativ, letztere positiv, und werden sie durch einen Draht verbunden, so fliefst in diesem ein Strom von der Sauerstoff- zur Wasserstoff-Elektrode so lange, bis die Gase von den Platten wieder vollständig in Lösung gegangen sind. In gleicher Weise fafst man auch die beim Eintauchen eines Metalls in einen Elektrolyten auftretende Potentialdifferenz als die Folge einer Neigung des Metalls auf, in den Ionenzustand überzugehen. Taucht man z. B. Zink in Schwefelsäure, so gehen Zinkionen, d. h. positiv geladene Zinkatome in die Lösung und laden diese positiv, während das Zink durch den Verlust der positiven Ladung negativ wird. Dieser Vorgang wird so lange andauern, bis die entstandene Potentialdifferenz zwischen Metall und Flüssigkeit, die ja die positiven Ionen nach dem negativ geladenen Metalle zurückzieht, dem Bestreben des Metalles, Ionen zu bilden, das Gleichgewicht hält. Man bezeichnet dieses Bestreben eines Metalles, Ionen zu bilden, als seinen „elektrolytischen Lösungsdruck“ (Lösungstension, Nernst 1889). Wenn aber die Potentialdifferenz zwischen Metall und Flüssigkeit von diesem Lösungsdrucke abhängt, so wird sie verschieden ausfallen, je nachdem die Flüssigkeit Ionen des betreffenden Metalles schon enthält oder nicht. Taucht man z. B. Zink in eine Lösung von Zinksulfat, die bereits Zinkionen enthält, so werden weniger Ionen entstehen können, da der osmotische Druck der vorhandenen Ionen dem elektrolytischen Lösungsdrucke entgegenwirkt. Infolgedessen wird die Potentialdifferenz zwischen dem Metall und der Lösung kleiner sein, als etwa zwischen dem Metall und reinem Wasser. Dies ist in der That der Fall, nicht blofs beim Zink, sondern bei allen unedlen Metallen. Sie laden sich in Berührung mit Flüssigkeiten stets negativ, aber in ihren Salzlösungen weniger als in reinem Wasser. Anders verhalten sich die edlen Metalle. Auch sie können wie alle Metalle nur positive Ionen bilden. Taucht man Kupfer in reines Wasser, so wird es negativ, die Flüssigkeit positiv. Taucht man aber Kupfer in die Lösung eines Kupfersalzes, so wird das Kupfer positiv und die Lösung negativ. Das Kupfer hat einen sehr geringen Lösungsdruck. Sind daher in der Lösung etwa Ionen mit einem beträchtlichen osmotischen Druck vorhanden, so ist die Lösung gegen das Kupfer gewissermafsen übersättigt an Ionen: es schlagen sich einige Ionen auf dem Kupfer nieder; das Metall wird positiv und die Flüssigkeit negativ, solange bis dem Drucküberschuss durch die entstandene Potentialdifferenz das Gleichgewicht gehalten wird. Da die an den Ionen haftenden Elektricitätsmengen sehr grofs sind, so sind die Substanzmengen, welche die beschriebenen Ladungen in der offenen Kette bewirken, unwägbar klein. Verbindet man aber die Pole eines Daniellschen Elements durch einen Draht und bringt ihre entgegengesetzten Ladungen dadurch zum Ausgleich, so wird auch das Gleichgewicht zwischen den Metallen und den Flüssigkeiten gestört. Der Lösungsdruck des Zinks treibt neue Zinkionen in die Lösung und der osmotische Druck der Kupferionen schlägt neue Kupfermengen auf dem Kupfer nieder. Durch das Spiel dieser Druckkräfte wird der Strom unterhalten, indem andauernd Zink sich auflöst und Kupfer sich niederschlägt.

Auf Grund dieser Vorstellungen über die Stromerzeugung in den galvanischen Elementen hat sich für eine Reihe von Fällen die elektromotorische Kraft der Elemente in befriedigender Übereinstimmung mit der Erfahrung berechnen lassen.

223. **Widerstand. Leitungsfähigkeit.** Wenn man ein galvanisches Element durch einen Draht schliefst, so zeigt ein gleichzeitig in den Schliefsungskreis eingeschalteter Strommesser (z. B. eine Tangentenbussole), dafs der Strom schwächer wird, wenn man den Schliefsungsdraht länger macht. Wir schreiben diese Schwächung des Stromes einem Widerstand zu, welchen der Draht dem Durchgang des Stromes entgegensetzt, vergleichbar dem durch Reibung verursachten Widerstand, welchen Wasser erleidet, welches in stationärer Bewegung durch eine Röhre strömt, an deren Enden verschiedener Druck herrscht (vgl. 68); wir nehmen an, dafs jener galvanische Widerstand, wie dieser, bei gleichem Querschnitt in demselben Verhältnis wie die Länge der Leitung wächst.

Für Drähte aus gleichem Stoff ergibt sich, dafs die Stromstärke ungeändert bleibt, wenn man ihre Längen und gleichzeitig in demselben Verhältnis ihre Querschnitte vergröfsert. Bei gleichbleibender Länge ist also der Widerstand eines Leiters seinem Querschnitt umgekehrt proportional. Die Gestalt des Querschnittes ist dabei gleichgiltig. Wird z. B. ein cylindrischer Draht ohne Änderung seiner Länge platt gewalzt, so ändert sich sein Widerstand nicht.

Verschiedene Stoffe zeigen bei gleichem Querschnitt und gleicher Länge verschiedenen Widerstand. Man kann z. B. einen Neusilberdraht durch einen $13^1/_2$ mal so langen Kupferdraht von gleichem Querschnitt ersetzen, ohne dafs die Stromstärke sich ändert; der Widerstand dieses Kupferdrahtes ist also gleich demjenigen des Neusilberdrahtes, oder bei gleicher Länge und gleichem Querschnitt ist der spezifische Widerstand des Kupfers nur $1 : 13^1/_2$ von demjenigen des Neusilbers, oder seine spezifische Leitungsfähigkeit ist $13^1/_2$ mal so grofs als diejenige des Neusilbers.

Zusammengefafst ergibt sich also: Der Widerstand eines linearen Leiters (z. B. Drahtes) steht im geraden Verhältnis seiner Länge, im umgekehrten Verhältnis seines Querschnittes und seiner spezifischen Leitungsfähigkeit.

Bezeichnet man die Länge eines Drahtes mit $l$, seinen Querschnitt mit $q$, seine spezifische Leitungsfähigkeit mit $k$, und seinen Widerstand mit $r$, so hat man hiernach:

$$r = \frac{l}{kq}.$$

Der spezifische Widerstand ist der reciproke Wert der spezifischen Leitungsfähigkeit, $= 1 : k$.

Durch Vergleichungen, wie die vorhin erwähnte zwischen Neusilber und Kupfer, genauer aber durch später zu besprechende Methoden, werden folgende Werte für die spezifische Leitfähigkeit einiger Leiter erster Klasse, diejenige des Quecksilbers $= 1$ gesetzt, gefunden:

| | | | |
|---|---|---|---|
| Quecksilber | 1 | Neusilber | 4 |
| Manganin (Ni, Mn, Cu) | 2 | Blei | 5 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Eisen | 8 | Aluminium | 32 |
| Platin | 8 | Gold | 46 |
| Aluminiumbronze | 8 | Siliciumbronze | 48 |
| Messing | 13 | Kupfer | 55 |
| Phosphorbronze | 13 | Silber | 64 |

Nach G. Wiedemann und Franz (1853) ist die elektrische Leitfähigkeit der Metalle ihrer Wärmeleitungsfähigkeit proportional (125).

Die Leitfähigkeit von Legirungen liegt nicht immer zwischen denjenigen ihrer Bestandteile. Die Leitfähigkeit eines Metalles wird oft durch eine geringe Beimischung eines anderen beträchtlich geändert. Auch Änderungen des inneren Gefüges üben Einfluſs auf die Leitfähigkeit; so z. B. nimmt mit den Härten des Stahls sein Leitvermögen zu.

Auch die zwischen den Elektroden einer Zersetzungszelle oder zwischen den Platten eines galvanischen Elements enthaltene Flüssigkeitsschicht kann als ein linearer Leiter, gleichsam als ein Flüssigkeitsdraht, angesehen werden, dessen Länge gleich dem längs der Strombahn gemessenen Abstand der Platten und dessen Querschnitt gleich der Oberfläche der Platten ist. Die Leitfähigkeit der Flüssigkeiten oder Leiter zweiter Klasse (Elektrolyte) ist weit geringer als diejenige der Metalle; so beträgt z. B. die Leitfähigkeit der verdünnten Schwefelsäure (30 $^0/_0$) nur 69 Millionteile (0,000069) von derjenigen des Quecksilbers, die einer konzentrierten Silbernitratlösung 0,000020, die einer gesättigten Lösung von Kupfersulfat 0,000004.

Der spezifische Widerstand der Metalle nimmt bei Erwärmung zu: die Zunahme für 1° C. oder der Temperaturkoëfficient beträgt z. B. für Quecksilber 0,00095, für die festen einfachen Metalle nahezu 0,00366 (nahezu gleich dem Ausdehnungskoëfficienten der Gase), für Neusilber nur 0,0004, noch weniger für Nickelin und Manganin. Bei Gaskohle und Graphit nimmt der Widerstand mit steigender Temperatur ab. Krystallinisches Selen leitet besser, wenn es von Licht bestrahlt wird. Der Widerstand des Wismuts wächst, wenn es von Magnetkraftlinien senkrecht zur Stromrichtung getroffen wird, proportional der Feldstärke. Vermöge dieses Verhaltens läſst sich die magnetische Feldstärke durch Widerstandsmessung bestimmen.

Bei den Leitern zweiter Klasse (den Elektrolyten) nimmt der Widerstand bei Erwärmung rasch ab; für konzentrirte Zinksulfatlösung z. B. um 4 Prozent für je 1°.

224. **Widerstandseinheit.** Als Einheit des Widerstandes wurde von W. Siemens derjenige eines Quecksilberfadens von 1 m Länge und 1 qmm Querschnitt bei einer Temperatur von 0° (1 Siemens) vorgeschlagen. Durch internationale Übereinkunft wurde neuerdings eine andere nach theoretischen Gesichtspunkten gewählte Widerstandseinheit, das Ohm (benannt zu Ehren G. S. Ohms, des Entdeckers der Gesetze des galvanischen Stromes) festgesetzt. Ein (legales) Ohm ist der Widerstand eines Quecksilberfadens von 106,3 cm Länge und 1 qmm Querschnitt bei 0° (oder von 106,3 cm Länge und, da der Querschnitt praktisch durch Wägung bestimmt wird, von 14,4521 g Gewicht).

225. **Rheostate.** Zur Feststellung der Einheit des Widerstandes hat man das Quecksilber gewählt, weil sich dasselbe jederzeit leicht (durch Destillation) in vollkommener Reinheit darstellen

läfst. Zum Gebrauche bei Messungen würde jedoch das flüssige Metall unbequem sein; man kann aber Drähte aus festem Metall so abpassen, dafs ihr Widerstand der Widerstandseinheit (1 Ohm) oder einem beliebigen Vielfachen oder Bruchteil derselben gleich ist. Als Material nimmt man zweckmäfsig Neusilber (54 % Kupfer, 28 % Zink, 18 % Nickel) oder noch besser Manganin (84 Kupfer, 12 Mangan, 4 Nickel), Konstantan (60 Kupfer, 40 Nickel) oder Nickelin (54 Kupfer, 26 Nickel, 20 Zink) Legirungen, die sich durch grofsen spezifischen Widerstand und geringe Abhängigkeit desselben von der Temperatur auszeichnen.

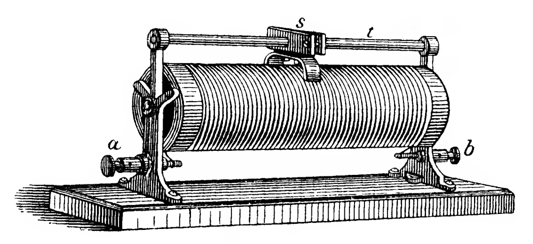
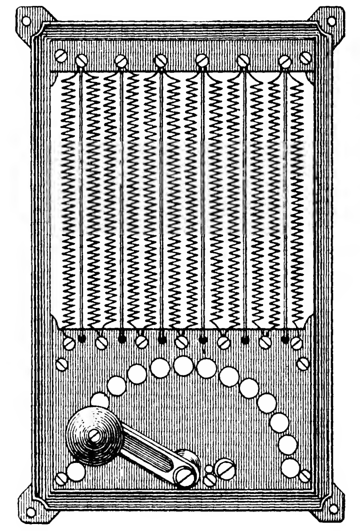


Fig. 186.
Einfacher Regulirwiderstand.

Vorrichtungen, welche dazu dienen, in einen Schliefsungskreis Widerstände von bekannter Gröfse nach Belieben ein- oder auszuschalten, ohne den Strom zu unterbrechen, sei es, um dadurch eine gewünschte Stromstärke zu erzielen, sei es behufs Vergleichung unbekannter Widerstände mit bekannten, nennt man **Rheostate**.


Fig. 187.
Technischer Regulirwiderstand.

Einen einfachen Regulirwiderstand, die neuere Gestaltung einer ursprünglich von Wheatstone angegebenen Rheostatenform zeigt Fig. 186. Auf einen Porzellancylinder mit eingeschnittener Schraubenlinie ist ein Konstantan- oder Nickelindraht aufgewickelt. Sein eines Ende steht mit der Klemme *a* in Verbindung, die isolirt durch den metallenen Träger des Porzellancylinders hindurchgeführt ist. Wird der Strom in *a* eingeleitet, so durchläuft er den Draht bis zu dem auf der Stange *t* verschiebbaren Bügel *s*, der mit kräftiger Feder auf dem aufgewickelten Drahte schleift. Dieser leitet den Strom auf den dicken Metallstab *t* über, durch den er zu dem metallenen Träger des Porzellancylinders und zur Austrittsklemme *b* gelangt. Je weiter nach der Klemme *b* hin der Bügel *s* geschoben wird, um so mehr Windungen des aufgewickelten Drahtes mufs der Strom durchlaufen.

Für gröfsere Stromstärken müssen die Widerstände mit Rücksicht auf die beim Stromdurchgange stattfindende Erwärmung (vgl. 234) aus dickeren Drähten hergestellt werden. Man spannt sie in Form enger Spiralen auf eisernen Rahmen zwischen isolirenden Schieferplatten so auf, dafs die Luft zwischen den Drähten entlang streichen und dadurch eine abkühlende Wirkung ausüben kann. Alle Spiralen sind hintereinander geschaltet und ihre Enden aufserdem mit isolirten Metallknöpfen verbunden, über die eine Metallkurbel hinweggleitet. Letztere wird mit dem einen Ende, der Anfang der ersten Spirale mit dem anderen Ende des Leitungskreises verbunden. Durch Drehen der Kurbel in dem einen oder anderen Sinne werden dann mehr oder weniger Spiralen in den Stromkreis eingeschaltet. Fig. 187 stellt diese in der Technik übliche Form des Regulirwiderstandes dar.

Für schwache Ströme, im besonderen bei der Vergleichung und Messung von Widerständen bedient man sich des Stöpselrheostaten (Fig. 188). Er besteht aus einer in einem Holzkasten aufgestellten Reihe von doppelt gewundenen Drahtspulen (265), deren Widerstände 1, 1, 2, 5, 10 u. s. w. Ohm betragen, und demnach wie ein Gewichtssatz jede beliebige Anzahl von Einheiten zusammenzusetzen erlauben. Über jeder Spule befindet sich auf dem aus Hartgummi hergestellten Deckel des Kastens eine dicke Messingplatte (*a*, *b*, *c* . . .); die erste *a* trägt die Klemmschraube *k*, die letzte die Klemmschraube *k'*. Das eine Drahtende jeder Spule ist an die darüber befindliche, das andere an die nächstfolgende Platte angelötet. An ihren gegenüberstehenden Seiten haben die Platten halbkreisförmige Ausschnitte, in welche messingene Stöpsel *s* eingesetzt werden können. Sind überall Stöpsel eingesetzt, so geht der Strom von *k* nach *k'* ohne merklichen Widerstand durch die dicken Metallplatten, ohne eine Drahtrolle zu durchlaufen. Zieht man aber einen oder mehrere Stöpsel aus, so geht der Strom durch die zugehörigen Spulen und erleidet den ihnen entsprechenden Widerstand.

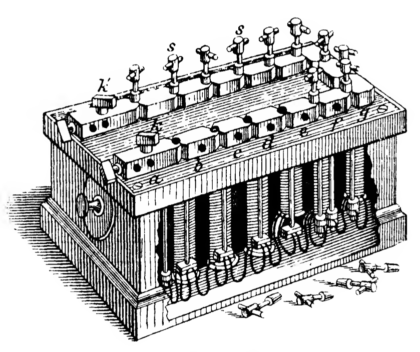


Fig. 188.
Stöpselrheostat.

226. **Ohmsches Gesetz.** Ein konstantes galvanisches Element werde durch einen Rheostaten und eine Tangentenbussole geschlossen, deren Kupferring samt Zuleitungsdrähten so dick ist, dafs sein Widerstand wegen des grofsen Querschnittes gegenüber dem Widerstand des übrigen Stromkreises nicht in Betracht kommt. Die Magnetnadel der Tangentenbussole wird um einen bestimmten Winkel

abgelenkt. Fügt man zu dem Element noch ein zweites ganz gleiches hinzu, indem man die beiden Elemente nach Art der Voltaschen Säule hintereinander schaltet, so ist die elektromotorische Kraft verdoppelt, zugleich aber auch der Widerstand innerhalb der Elemente, da jetzt die zu durchlaufende Flüssigkeitssäule die doppelte Länge hat. Man mufs nun, damit die Tangentenbussole die nämliche Ablenkung wie vorhin zeige, oder damit die Stromstärke die nämliche bleibe, am Rheostaten die doppelte Drahtlänge einschalten, also auch den Widerstand des Schliefsungsdrahtes verdoppeln. Die Stromstärke ändert sich also nicht, wenn das Verhältnis der elektromotorischen Kraft zu dem Gesamtwiderstand des Schliefsungskreises ungeändert bleibt. Wenn man dagegen das ursprüngliche Element durch zwei Elemente derselben Art ersetzt, deren Platten dieselbe Gröfse, aber nur den halben Abstand voneinander haben, so ist hiermit die elektromotorische Kraft ebenfalls verdoppelt, der Widerstand aber nicht geändert, da die Gesamtlänge der zu durchlaufenden Flüssigkeit die nämliche geblieben ist. Die Tangentenbussole zeigt aber jetzt die doppelte Stromstärke an. Die Stromstärke ist somit der elektromotorischen Kraft proportional.

Durch ähnliche Versuche fand G. S. Ohm (1826) das nach ihm benannte wichtige Gesetz:

Die Stromstärke ist der elektromotorischen Kraft direkt, dem Gesamtwiderstand des Stromkreises umgekehrt proportional.

Man hat die Einheit der elektromotorischen Kraft so gewählt, dafs sie in einem Stromkreis vom Widerstand 1 Ohm einen Strom von der Stärke 1 Ampère hervorruft, und diese Einheit zu Ehren Voltas „Volt“ genannt. Mit Zugrundelegung dieser Einheiten kann man das Ohmsche Gesetz auch so aussprechen: Die Stromstärke ($J$, in Ampère) ist gleich der elektromotorischen Kraft ($E$, in Volt) dividirt durch den Gesamtwiderstand ($R$, in Ohm), oder $J = E : R$.

Da die elektromotorische Kraft dem Spannungsunterschied an den Polen des nicht geschlossenen Elements entspricht und durch diesen gemessen wird, so kann man sie durch ein Elektrometer, z. B. das Thomsonsche Quadrantenelektrometer, ermitteln, indem man den einen Pol mit dem einen Quadrantenpaar, den anderen Pol aber und das andere Quadrantenpaar mit der Erde in Verbindung setzt, und den Ausschlag des Instruments mit demjenigen vergleicht, welchen ein konstantes Normalelement, dessen elektromotorische Kraft in Volt bekannt ist, hervorbringt. Als Normalelement verwendet man das Daniellsche (1,104 Volt), besser dasjenige von Latimer Clark (1,433 Volt), oder von Weston (1,019 Volt). Das Daniellsche Element selbst wird auch häufig als praktische Einheit der elektromotorischen Kraft (1 Daniell) gebraucht.

Wird ein galvanisches Element durch einen Draht geschlossen, so nimmt vom positiven Pol an die Spannung längs des Drahtes

ab, weil ja eine Strömung der positiven Elektricität nur von Stellen höheren Potentials zu solchen niedrigeren Potentials stattfinden kann. Die elektrometrische Untersuchung ergibt, dafs die Spannung um gleichviel abnimmt, wenn man den Stromkreis entlang in der Richtung des Stromes um Strecken gleichen Widerstandes fortschreitet, oder dafs die Abnahme der Spannung stets dem Widerstande des durchschrittenen Leiterstückes proportional ist. Der Quotient aus dem Spannungsunterschied der beiden Enden eines Leiterstückes und dessen Widerstand ist also in einem und demselben Stromkreis konstant, und diese Konstante ist eben die Stromstärke, von der wir ja wissen, dafs sie an allen Stellen eines im stationären Zustand befindlichen Stromkreises die nämliche ist. Das Ohmsche Gesetz „Stromstärke ist gleich Spannungsunterschied dividirt durch Widerstand" gilt also nicht nur für den ganzen Stromkreis, sondern auch für jeden beliebigen seiner Teile besonders.

Die Spannungsdifferenz zwischen den Enden eines beliebigen Leiterstückes ergibt sich hiernach, wenn man die Stromstärke mit dem Widerstand des Leiters multiplizirt. Insbesondere findet man den Spannungsunterschied zwischen den Endpunkten des Schliefsungsdrahtes oder zwischen den Polklemmen einer geschlossenen Batterie, die sogenannte „Klemmenspannung", als Produkt der Stromstärke mit dem Widerstand des Schliefsungsbogens. Die Klemmenspannung der geschlossenen Batterie ist sonach stets kleiner als ihre gesamte elektromotorische Kraft, welche ja dem Produkte der Stromstärke mit dem Gesamtwiderstande gleich ist, nähert sich derselben aber um so mehr, je gröfser der Widerstand des Schliefsungsbogens wird, und erreicht sie, wenn die Batterie offen, d. i. der Widerstand der Schliefsung unendlich grofs ist.

227. **Anwendungen des Ohmschen Gesetzes.** Das Ohmsche Gesetz ist für alle praktischen Anwendungen des galvanischen Stromes von unschätzbarer Wichtigkeit, weil es zu beurteilen gestattet, auf welche Art die Batterie für einen bestimmten Zweck zusammengesetzt werden mufs. Der Widerstand in jedem Schliefsungskreis ist nämlich zusammengesetzt aus zwei Teilen, aus dem Widerstand, den der Strom beim Durchgang durch die Flüssigkeit innerhalb der Elemente zu überwinden hat, oder dem inneren (wesentlichen) Widerstand, und dem äufseren (aufserwesentlichen) Widerstand, den der von Pol zu Pol geführte Schliefsungsbogen darbietet. Verbindet man daher eine Anzahl von Elementen, z. B. zehn, nach dem Vorbild der Voltaschen Säule hintereinander, so wird nicht nur die elektromotorische Kraft, sondern auch der innere Widerstand zehnmal so grofs; ist nun der äufsere Widerstand so klein, dafs er gegen den inneren kaum in Betracht kommt, wird z. B. die Batterie durch einen kurzen dicken Metalldraht geschlossen, so wird die Verzehnfachung der elektromotorischen Kraft durch diejenige des Widerstandes aufgehoben, und die zehnpaarige Batterie gibt keinen stärkeren Strom

als ein einziges ihrer Elemente. Es ist in diesem Falle, nämlich bei sehr kleinem äuſserem Widerstand von Vorteil, nur ein einziges Element, aber mit möglichst groſsen Platten, zu wählen. Macht man nämlich die Platten des Elements z. B. zehnmal gröſser, so bleibt die elektromotorische Kraft zwar ungeändert, der innere Widerstand wird aber zehnmal geringer, weil der Querschnitt des zwischen den Platten enthaltenen flüssigen Leiters zehnmal gröſser geworden ist; man erreicht also mit dem zehnmal so groſsen Element eine zehnmal so groſse Wirkung. Es ergibt sich hieraus die Regel, daſs bei geringem äuſserem Widerstand die Anwendung vieler hintereinander geschalteter Elemente keinen Vorteil gewährt, wohl aber die Anwendung eines einzigen möglichst groſsen Elements. Aus den verfügbaren zehn Elementen kann man aber sofort ein einziges Element mit zehnfacher Plattenoberfläche herstellen, wenn man alle positiven (z. B. Kupfer- oder Platin-) Platten unter sich, und alle negativen (z. B. Zink-) Platten unter sich, oder wenn man die zehn Elemente nicht zu einer Säule hintereinander, sondern zu einem Element nebeneinander verbindet. Ist dagegen der äuſsere Widerstand sehr groſs, wie z. B. derjenige eines viele Kilometer langen Telegraphendrahtes, so wird man einen um so stärkeren Strom erzielen, je mehr Elemente man hintereinander zu einer Batterie zusammensetzt, weil die elektromotorische Kraft mit der Anzahl der Elemente wächst, der Gesamtwiderstand aber kaum geändert wird. Je gröſser der äuſsere Widerstand ist, desto weniger kommt es darauf an, ob der innere Widerstand gröſser oder kleiner ist, oder ob man kleine oder groſse Plattenpaare anwendet; mit kleinen Elementen wird man in diesem Falle dasselbe erreichen, wie mit gröſseren und kostspieligeren. Wenn eine Anzahl (z. B. zehn) Elemente zur Verfügung stehen, so kann man dieselben in verschiedener Weise zusammenstellen, nämlich zu einem Element von zehnfacher Plattengröſse, oder zu einer Säule aus zwei Elementen von fünffacher Gröſse, oder aus fünf Elementen von doppelter Gröſse, oder endlich aus zehn Elementen von einfacher Gröſse. Auf die Frage, welche von diesen Verbindungen die gröſste Stromstärke liefert, gibt das Ohmsche Gesetz die Antwort: diejenige, bei welcher der innere Widerstand dem gegebenen äuſseren Widerstand möglichst nahe gleichkommt. Eine Vorrichtung, welche solche Verbindungen rasch herzustellen und schnell miteinander zu vertauschen gestattet, so daſs die vorteilhafteste leicht ausgewählt werden kann, heiſst ein Pachytrop.

Auch für die vorteilhafteste Einrichtung der Galvanometer gibt das Ohmsche Gesetz die Regel, den Draht so zu wählen, daſs der Widerstand der Multiplikatorwindungen demjenigen des übrigen Stromkreises möglichst gleich wird. Hat der zu messende Strom auſserhalb des Galvanometers groſse Widerstände, z. B. Flüssigkeiten, zu durchlaufen, so macht man den Multiplikator aus möglichst zahlreichen Windungen eines dünnen Drahtes; denn in diesem Falle ist die Ablenkung der Magnetnadel der Anzahl der Windungen nahezu

proportional; ist jedoch der Widerstand des übrigen Stromkreises gering (wie z. B. bei der Thermosäule), so nützen zahlreiche Windungen nichts, sondern wenige Windungen eines dicken Drahtes sind vorteilhafter; denn in diesem Falle ist der Ausschlag dem Querschnitt des Multiplikatordrahtes proportional und unabhängig von seiner Windungszahl.

228. **Konstanten galvanischer Elemente.** Wird ein galvanisches Element durch eine Tangentenbussole mit dickem Draht, also unmerklichem Widerstand, geschlossen, so zeigt dieselbe die Stromstärke

$$J = \frac{E}{R}$$

an, wenn $E$ die elektromotorische Kraft, $R$ den inneren Widerstand des Elements bedeutet. Schaltet man nun mittels eines Rheostaten noch einen bekannten Widerstand $r$ hinzu, so wird die Stromstärke auf

$$J' = \frac{E}{R + r}$$

herabgemindert. Aus diesen beiden Gleichungen, in welchen die Stromstärken $J$ und $J'$ und der Widerstand $r$ bekannt sind, lassen sich die zwei Unbekannten $E$ und $R$, nämlich die elektromotorische Kraft und der innere Widerstand des Elements leicht berechnen. Man nennt sie „die Konstanten des galvanischen Elements". Dieses von Ohm angegebene Verfahren ist jedoch nur auf konstante Elemente anwendbar. Andere Methoden zur Bestimmung der elektromotorischen Kraft werden weiterhin zur Sprache kommen.

Die elektromotorischen Kräfte einiger galvanischer Elemente sind:

| | |
|---|---|
| Daniell . . . . . . . . | 1,104 Volt |
| Bunsen oder Grove . . | 1,9 „ |
| Chromsäure-Element . . | 2,0 „ |
| Meidinger . . . . . . | 1,0 „ |
| Leclanché . . . . . . | 1,3 „ |
| Latimer Clark . . . . | 1,433 „ |
| Weston . . . . . . . | 1,019 „ |
| Blei-Accumulator . . . | 1,9—2 „ |

Der innere Widerstand der Elemente hängt von ihren Dimensionen und der Art ihrer Zusammensetzung ab. Bei Elementen mit Thonzelle, wie Daniell und Bunsen, ist besonders die Beschaffenheit der Thonzelle von Einfluſs. Für die gebräuchlichen Formen liegt der Widerstand bei den Daniell-Elementen zwischen 0,3 und 0,6 Ohm, bei den Bunsen-Elementen zwischen 0,1 und 0,2 Ohm. Bei den Accumulatoren stehen sich die Platten in geringer Entfernung mit sehr groſser Oberfläche gegenüber. Der Widerstand ist daher sehr gering. Infolgedessen muſs man mit Accumulatoren vorsichtiger umgehen, als mit den gewöhnlichen Elementen, da sie bei Kurzschluſs (d. h. bei direkter Verbindung der Pole ohne äuſseren Widerstand) hohe Stromstärken von zerstörenden Wirkungen geben (Sicherungen, vgl. 234).

229. **Stromverzweigung.** Bisher betrachteten wir einen einfachen Stromkreis; jetzt nehmen wir an, daſs der Schlieſsungsdraht

des Elements oder der Batterie *E* sich im Punkte *a* (Fig. 189) in zwei Teile teilt, die im Punkte *b* wieder zusammengehen. Da an jedem der Verzweigungspunkte, damit der stationäre Zustand erhalten bleibe, ebenso viel Elektricität abströmen mufs, als zugeflossen ist, so mufs die Summe der Stromstärken in den Zweigen *amb* und *anb* der Stromstärke in dem unverzweigten Teile *bEa* gleich sein. Da ferner derselbe Spannungsunterschied es ist, nämlich derjenige zwischen den Punkten *a* und *b*, welcher die beiden Zweigströme in Bewegung setzt, so müssen die Spannungsverluste längs *amb* und längs *anb*, d. i. die Produkte der Stromstärken mit den zugehörigen Widerständen einander gleich sein, oder, was dasselbe heifst, die Stromstärken in den Zweigen verhalten sich umgekehrt wie deren Widerstände. Ist z. B. der Widerstand in der Abzweigung oder in dem „Nebenschlufs" (engl. Shunt) *anb* 99 mal so grofs als in dem Stück *amb*, so ist die Stromstärke in *amb* 99 mal und die Stärke des Gesamtstromes 100 mal so grofs als diejenige in *anb*.

Man macht hiervon Gebrauch, um mittels eines Galvanometers, das nur auf schwache Ströme berechnet ist, auch starke Ströme zu messen, indem man das Galvanometer „in den Nebenschlufs (*anb*)

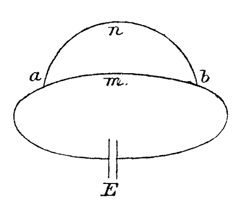



Fig. 189.
Stromverzweigung.

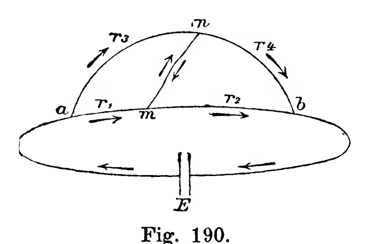



Fig. 190.
Wheatstonesche Brücke.

legt". Kennt man nämlich den Widerstand der Drahtwindungen des Galvanometers und den Widerstand von *amb*, so ist die Stromstärke in *amb* sovielmal gröfser als die am Galvanometer abgelesene, als der Widerstand des Galvanometers gröfser ist als derjenige des Drahtstückes *amb*. Die Stromstärke des Hauptstromes ist alsdann gleich der Summe der Stromstärken in *amb* und in *anb*.

Ein Galvanometer von grofsem Widerstand im Nebenschlufs kann auch zur Bestimmung des Spannungsunterschiedes zwischen den beiden Punkten *a* und *b* der Hauptleitung, an welche es angelegt ist, dienen. Denn dieser Spannungsunterschied ist der Stromstärke multiplizirt mit dem Widerstande des Galvanometerdrahtes gleich, also der Stromstärke im Galvanometer proportional. Es läfst sich daher, wenn man den Widerstand des Galvanometers in Ohm und für jeden seiner Ausschläge die Stromstärke in Ampère kennt, der Potentialunterschied zwischen den Punkten *a* und *b* (z. B. die Klemmspannung, wenn *a* und *b* die Polklemmen sind) als Produkt dieser beiden Gröfsen in Volt angeben, oder sogar unmittelbar ablesen, wenn man das

Instrument mit einer nach Volt geteilten Skala versehen hat. Solche Instrumente mit vielen Windungen eines dünnen Drahtes, welche in den Nebenschluſs zu liegen kommen, heiſsen Spannungsmesser oder Voltmeter.

230. **Wheatstonesche Brücke.** Verbindet man die beiden Zweige *amb* und *anb* (Fig. 190) einer Stromleitung durch einen Querdraht *mn*, die sogenannte „Brücke", so flieſst in der Brücke ein Strom, dessen Richtung davon abhängt, welcher von den beiden Punkten *m* und *n* die höhere Spannung hat. Da nun sowohl längs *amb* als längs *anb* die Spannung von dem Werte, den sie in *a* hat, bis zu dem Werte, den sie in *b* hat, abnimmt, so gibt es zu jedem Punkte *m* auf dem einen Draht einen Punkt *n* auf dem anderen Draht, in dem die Spannung den gleichen Wert wie in *m* hat. Verbindet man zwei solche Punkte, so flieſst in der verbindenden Brücke kein Strom. Dann flieſsen die Ströme in den Drähten *amb* und *anb* so, als ob die Brücke gar nicht vorhanden wäre. Die Spannung sinkt dann auf den beiden Drähten von *a* bis *b* proportional dem Widerstande und die beiden Punkte *m* und *n*, in welchen auf beiden Seiten gleiche Spannung herrscht, müssen so liegen, daſs sich $r_1$ zu $r_2$ verhält wie $r_3$ zu $r_4$, wenn man die Widerstände der Leiterstücke *am*, *mb*, *an*, *nb* der Reihe nach mit $r_1$, $r_2$, $r_3$, $r_4$ bezeichnet.

Wheatstone (1843) hat diese Brückenverzweigung dazu benutzt, um Widerstände von Leitern zu messen. Schaltet man nämlich bei $r_4$ den Leiter, dessen Widerstand bestimmt werden soll, und bei $r_2$ einen Rheostaten ein, und verändert den Widerstand des letzteren so lange, bis ein in die Brücke geschaltetes Galvanometer auf Null einspielt, so verhält sich der gesuchte Widerstand zu demjenigen des Rheostaten, wie die bekannten Widerstände $r_3$ und $r_1$; hat man letztere einander gleich gemacht, so ist der gesuchte Widerstand gleich demjenigen des Rheostaten. Die Galvanometernadel verhält sich dann gleichsam wie die Zunge einer Wage, welche durch ihr Einspielen anzeigt, daſs die Zweige $r_4$ und $r_2$ mit Widerstand gleich belastet sind.

Man kann das Brückenverfahren auch so ausführen, daſs man zwischen *a* und *b* einen Draht, den Meſsdraht, längs einem in Millimeter geteilten Maſsstab ausspannt, und auf demselben das mit Kontaktschlitten versehene Ende *m* des Brückendrahtes so lange verschiebt, bis das Galvanometer in der Brücke auf Null zeigt. Dann steht der gesuchte Widerstand $r_4$ zu dem bekannten Widerstand $r_3$ in demselben Verhältnis, wie die Strecke *mb* des Meſsdrahtes zur Strecke *am*.

Das Bolometer (Strahlungsmesser) von Langley (1881) besteht aus einer Wheatstoneschen Brücke, in deren beide Zweige je eine Anzahl dünner Drähte aus Stahl oder Platin, welche bei gleicher Temperatur gleichen Widerstand haben, eingeschaltet sind. Wird nun die eine Partie Drähte von Wärmestrahlen getroffen, so erwärmt sie sich und vermehrt folglich ihren Leitungswiderstand. Das in die Brücke eingeschaltete Galvanometer, welches bei gleicher Tem-

peratur der beiden Drahtpartien in Ruhe war, wird nun infolge des in der Brücke auftretenden Stromes ausschlagen. Das Instrument vermag auf diese Weise äuſserst geringe Temperaturveränderungen anzuzeigen.

231. **Kompensationsverfahren.** Wirken in einem einfachen Stromkreis zwei elektromotorische Kräfte einander entgegen, so entsteht ein Strom, der ihrer Differenz entspricht, und gar kein Strom, wenn die elektromotorischen Kräfte einander gleich sind. Man findet z. B., daſs man einer Batterie von 10 Bunsenschen Elementen eine solche von 17 bis 18 Daniellschen Elementen entgegenschalten muſs, damit ein in den Stromkreis eingefügtes Galvanometer auf Null einspiele. Daraus folgt, daſs die elektromotorische Kraft eines Bunsenelements 1,7 bis 1,8 Daniell beträgt. Es lassen sich also auf diese Weise die elektromotorischen Kräfte verschiedener Elemente angenähert miteinander vergleichen

Eine genauere Vergleichung erreicht man durch die folgende Stromverzweigung (Poggendorff, 1841). An die Punkte $m$ und $n$ (Fig. 191) des Stromkreises, in welchen bei $E$ und $e$ die zu vergleichenden Elemente in entgegengesetzter Stellung, d. i. mit gleichnamigen Polen verbunden, eingeschaltet sind, wird ein Querdraht $m\,n$ angelegt, der einen Rheostat enthält. In dem Teil des Stromkreises, der das Element mit der kleineren elektromotorischen Kraft $e$ enthält, befindet sich ein Galvanometer $G$. Man ändert nun den Widerstand des Rheostaten so lange, bis das Galvanometer auf Null einspielt. Dann ist in dem Zweige $m\,e\,G\,n$ gar kein Strom, und die Strömung in dem geschlossenen Kreise $E\,m\,n\,E$ muſs sich so herstellen, als ob der Zweig $m\,e\,G\,n$ gar nicht vorhanden wäre. Ist $R$ der Widerstand des Zweiges $m\,E\,n$ (also hauptsächlich der innere Widerstand des Elements $E$), $r$ derjenige des Querdrahtes samt Rheostat, so ist nach dem Ohmschen Gesetz die Stromstärke in diesem Kreise $J = E\,/\,(R + r)$. Damit gleichzeitig in dem Zweige $m\,e\,G\,n$ die Stromstärke Null sein könne, muſs die Spannungsdifferenz an seinen Endpunkten $m$ und $n$, welche durch das Produkt aus der Stromstärke $J$ mit dem Widerstand $r$ des Querdrahtes ausgedrückt wird, der entgegenwirkenden elektromotorischen Kraft $e$ gleich sein, d. h. man hat $J\,r = e$. Daraus aber folgt, daſs sich die elektromotorischen Kräfte $E$ und $e$ zu einander verhalten, wie die bekannten Widerstände $R + r$ und $r$. Ist der innere Widerstand $R$ des Elementes $E$ nicht bekannt, so schaltet man in den Zweig $m\,E\,n$ noch einen Widerstand $R'$ hinzu: alsdann muſs der Widerstand von $m\,n$ in $r'$ abgeändert werden, damit das Galvanometer einspiele, und man hat auſser der Gleichung $E\,r = e\,(R + r)$ noch die zweite $E\,r' = e\,(R + R' + r')$, aus welchen vereint, auſser dem Verhältnis der elektromotorischen Kräfte auch noch der innere Widerstand $R = R'\,r\,/\,(r' - r)$ gefunden wird.

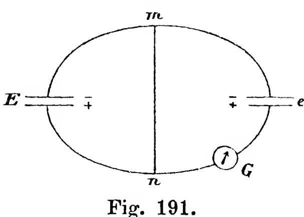


Fig. 191.
Kompensation.

232. **Kirchhoffsche Sätze.** Nach denselben Grundsätzen, wie in diesen besonderen Beispielen, läſst sich die Aufgabe der Stromverzweigung ganz allgemein behandeln.

An jedem Verzweigungspunkt muſs in jedem Augenblick ebensoviel Elektricität abflieſsen als zuströmen. Rechnet man die zuflieſsenden Stromstärken positiv, die abströmenden negativ, so lautet dieser Satz:

1. In jedem Verzweigungspunkt ist die Summe aller Stromstärken gleich Null.

Jeder verzweigte Stromkreis kann in eine Anzahl in sich geschlossener einfacher Stromkreise zerlegt werden. In der Fig. 190

z. B. kann man die folgenden geschlossenen Bahnen verfolgen: *EambE*, *EanbE*, *anbma*, *anma*, *mnbm*. In jedem dieser Stromringe nun mufs die Summe aller Spannungsverluste gleich der Summe der im Ringe wirkenden elektromotorischen Kräfte sein, also gleich Null, wenn der betreffende Ring, wie z. B. die drei letztgenannten, elektromotorische Kräfte gar nicht enthält. Es ergibt sich also noch der zweite Satz:

2. In jedem einfach in sich geschlossenen Teil eines verzweigten Stromkreises ist die Summe der Produkte aus Stromstärken und zugehörigen Widerständen gleich der Summe der in diesem Teile wirkenden elektromotorischen Kräfte.

Diese beiden von Kirchhoff (1847) ausgesprochenen Sätze, welche der allgemeinste Ausdruck des Ohmschen Gesetzes für linienförmige Leiter sind, liefern in jedem Falle so viele Gleichungen, als zur Bestimmung der Stromstärken der einzelnen Zweige bei gegebenen Widerständen und elektromotorischen Kräften erforderlich sind.

233. **Strömung in körperlichen Leitern.** Wie in den bisher allein betrachteten linien- und drahtförmigen Leitern bildet sich auch in leitenden Flächen (z. B. Metallplatten) und in leitenden Körpern, welche man in den Stromkreis einer Batterie einschaltet, ein stationärer Stromzustand aus, indem die Elektricität von Stellen höherer Spannung zu solchen von niedrigerer Spannung übergeht. Zwischen Punkten gleicher Spannung dagegen kann keine Strömung stattfinden. Berührt man zwei Punkte einer vom Strom durchflossenen

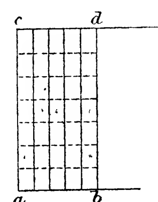


Fig. 192.
Stromlinien.

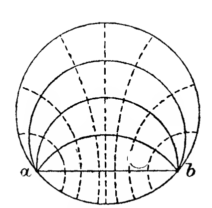


Fig. 193.
Stromlinien.

Metallplatte mit den Drahtenden eines Galvanometers, so gibt dieses einen Ausschlag, wenn in den berührten Punkten verschiedene Spannung herrscht. Man kann aber leicht, indem man das eine Drahtende verschiebt, eine Reihe von Punkten finden, für die das Galvanometer in Ruhe bleibt. In diesen Punkten ist die Spannung die nämliche, wie in dem vom ersten Drahtende berührten Punkte; sie bilden in ihrer Gesamtheit eine durch letzteren Punkt gehende Linie gleicher Spannung oder gleichen Potentials. Ebenso findet man in körperlichen Leitern Flächen gleicher Spannung, äquipotentiale Flächen oder Niveauflächen. Von einer Niveaufläche stationären Potentials zur nächst niedrigen geht die elektrische Strömung in Linien (Stromlinien), welche auf jeder dieser Flächen senkrecht stehen, entsprechend den Kraftlinien beim elektrostatischen Potential, und es gilt für jeden von solchen Stromlinien begrenzten „Stromfaden" das Ohmsche Gesetz.

Auf einer rechteckigen Metallplatte z. B., an deren gegenüberstehende Seiten *ab* und *cd* (Fig. 192) die Poldrähte einer galvanischen Batterie angelötet sind, verlaufen die Linien gleicher Spannung parallel zu diesen Seiten, die

Stromlinien parallel zum anderen Seitenpaar. Legt man die Zuleitungsdrähte der Batterie an zwei Punkte *a* und *b* (Fig. 193) des Umfanges einer Kreisscheibe, so sind die äquipotentialen Linien Kreise, deren Mittelpunkte auf der Verbindungslinie *a b* des Ein- und Ausströmungspunktes zu diesen harmonisch liegen, und die zu ihnen senkrechten Stromlinien sind Kreise, welche durch diese Punkte *a* und *b* hindurchgehen.

234. **Stromwärme. Joulesches Gesetz.** Bald nach Erfindung der Voltaschen Säule bemerkte man, dafs die vom Strome durchflossenen Leiter sich erwärmen, und dafs bei hinreichender Stromstärke Drähte sogar zum Glühen und Schmelzen gebracht werden.

Indem Joule (1841) spiralförmig gewundene durchströmte Drähte in ein Kalorimeter tauchen liefs, das zur Vermeidung von Nebenschlüssen mit einer nichtleitenden Flüssigkeit (z. B. Alkohol, Benzin, Terpentinöl u. s. w.) von bekannter spezifischer Wärme gefüllt war, fand er das nach ihm benannte Gesetz: Die in einem Leiter in der Zeiteinheit entwickelte Wärmemenge ist proportional dem Widerstande des Leiters und proportional dem Quadrate der Stromstärke.

Man hätte das Joulesche Gesetz auch ohne Versuche durch folgende auf das Prinzip der Erhaltung der Energie gestützte Überlegung finden können. Wenn die in der Zeiteinheit den Draht durchfliefsende Elektricitätsmenge, d. i. die Stromstärke $J$, von dem höheren Potential am einen Ende des Drahtes bis zu dem niedrigeren am anderen Ende herabsinkt, so leistet sie Arbeit, welche gleich ist dem Produkt aus dieser Elektricitätsmenge und dem Potentialunterschied an den Drahtenden. Nach dem Ohmschen Gesetze aber ist dieser Potentialunterschied $E$ oder Spannungsverlust gleich dem Produkte aus Stromstärke $J$ und Widerstand $R$ des Drahtstückes, also $= JR$. Die von dem Strom in dem Drahtstück geleistete Arbeit ist demnach $JJR$ oder $J^2R$. Diese Arbeit wird in dem Drahte in die ihr äquivalente Wärmemenge $W$ umgewandelt. Man hat daher, wenn man als Einheit der Wärmemenge die der Arbeitseinheit (Erg) äquivalente Wärmemenge wählt, das Joulesche Gesetz: $W = J^2R$ oder, weil $JR = E$ ist, auch $W = JE$. Die in 1 Sekunde in einem Leiterstück entwickelte Wärme oder die ihr entsprechende Arbeit pro Sekunde, oder der „Effekt“ des Stromes, wird demnach gemessen durch das Produkt aus der Potentialdifferenz ($E$) des Stückes in Volt mit der Stromstärke in Ampère, und erscheint dann ausgedrückt in einer Einheit, die man 1 „Voltampère“ oder auch 1 „Watt“ nennt. 1 Watt = 10 Millionen Erg pro Sek. = 0,1019 Meterkilogramm pro Sek. = $^1/_{736}$ Pferdekraft (vgl. 17).

Nach dem Prinzip von der Erhaltung der Energie mufs dieser in der Strombahn als Wärme auftretenden Energiemenge eine gleich grofse Menge von verschwindender Energie anderer Art entsprechen. Erzeugen wir den Strom auf mechanischem Wege, durch Drehen einer Elektrisirmaschine oder einer der später zu besprechenden Dynamomaschinen, so ist die aufgewandte mechanische Arbeit die

Quelle der Stromenergie. Erzeugen wir den Strom auf chemischem Wege mittels galvanischer Elemente, so ist der Energieumsatz der in der Kette vor sich gehenden chemischen Prozesse die Quelle der elektrischen Energie. Löst man Zink in Schwefelsäure auf, so bemerkt man dabei eine beträchtliche Wärmeentwickelung. Löst sich dagegen das Zink als Träger eines elektrischen Stromes in einem galvanischen Elemente auf, so entsteht aus der verschwindenden chemischen Energie zunächst elektrische Energie, die sich dann erst im Schliefsungskreis in Wärme verwandelt. Die ganze Wärmemenge, die im Schliefsungskreis auftritt, während sich im Elemente ein Grammäquivalent der Elektrodenstoffe umsetzt, kann daher nach dem Gesetz von der Erhaltung der Energie nicht gröfser, im günstigsten Falle nur gerade gleich der Wärmemenge sein, die bei direkter chemischer Umsetzung eines Grammäquivalentes jener Stoffe frei wird.

Aus dem Jouleschen Gesetze erklärt es sich, dafs Metalldrähte durch den Strom um so höher erwärmt werden, je dünner sie sind und je geringer das Leitungsvermögen des Metalls ist. Läfst man z. B. den Strom durch eine Kette aus gleichdicken abwechselnden Silber- und Platindrähten geben, so erhitzen sich die Platindrähte stärker als die weit besser leitenden Silberdrähte, und können zum Glühen kommen, während diese dunkel bleiben (Children, 1815).

Man benutzt das Erglühen von Drähten zum Sprengen von Minen mittels Patronen, in welchen ein dünner Platindraht angebracht ist, dem durch isolirte dicke Kupferdrähte der Strom einer Batterie zugeführt wird. In der Heilkunde bedient man sich galvanisch glühender Platindrähte, um Geschwüre u. dgl., um welche der Draht wie eine Schlinge gelegt wird, wegzuätzen (Galvanokaustik).

Auch hat man Instrumente zum Messen der Stromstärke gebaut, bei denen die durch die Stromwärme erzeugte Verlängerung eines Drahtes einen Zeiger dreht, der die Stromstärke auf einer Skala direkt abzulesen gestattet. Solche Instrumente nennt man Hitzdrahtinstrumente.

Andererseits mufs man bei Versuchen oder elektrischen Anlagen die Kupferdrähte, die man zur Stromleitung benutzt, so dick wählen, dafs die in ihnen stattfindende Erwärmung ein gewisses ungefährliches Mafs nicht überschreitet. Für mittlere Stromstärken rechnet man für je 3 Ampère 1 qmm Querschnitt, so dafs also ein Leitungsdraht, durch den 30 Ampère fliefsen sollen, einen Querschnitt von 10 qmm haben müfste. Um aber solche Leitungen, oder um Apparate vor zu hohen Stromstärken und den dadurch hervorgerufenen zerstörenden Wirkungen zu schützen, macht man abermals von der Stromwärme Gebrauch, indem man in den Stromkreis sogenannte „Sicherungen“ einschaltet. Das sind kurze Enden von Draht oder Blech aus Blei oder leicht schmelzbaren Metallkompositionen, die, sobald der Strom im Leitungskreise eine gewisse, durch den Querschnitt der Sicherung

bestimmte Stärke erreicht, durchschmelzen und den Strom auf diese Weise unterbrechen.

235. **Glühlampen.** Die ausgedehnteste Anwendung macht man von der Stromwärme in der elektrischen Beleuchtung. Doch kann man hierfür nicht Metalle verwenden, weil sie bei höheren Glühtemperaturen schmelzen, sondern mufs sich der unschmelzbaren Kohle bedienen. Edison war der erste (1879), der aus Bambusfasern dünne Kohlefäden herstellte, die durch den elektrischen Strom zu heller Weifsglut erhitzt werden konnten. Da sie aber an der Luft verbrennen würden, so müssen sie in eine luftleer gemachte Glashülle eingeschlossen werden. Fig. 194 zeigt eine derartige Glühlampe. Der dünne Kohlefaden, der heutzutage aus reiner Cellulose hergestellt wird, ist mit seinen Enden an zwei Platindrähte angesetzt,

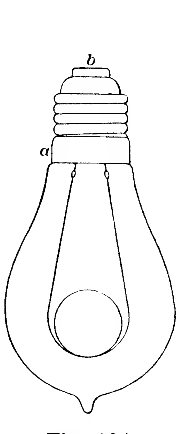



Fig. 194.
Glühlampe.

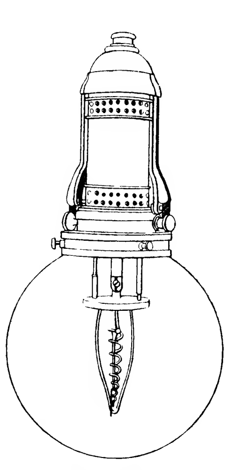


Fig. 195.
Nernstlampe.

die in die Glashülle eingeschmolzen sind und von denen der eine aufserhalb mit dem messingenen Schraubengewinde *a*, der andere mit der von jenem isolirten Metallplatte *b* in Verbindung steht. Mit dem Schraubengewinde wird die Lampe in die „Fassung" eingeschraubt, deren Mutter mit dem einen Pol der Stromquelle in Verbindung steht, während mit dem anderen Pol ein kleiner, isolirt in der Fassung sitzender Hebel verbunden ist, durch dessen Umlegung der Kontakt zwischen dem zweiten Pole und der Platte *b* hergestellt und die Lampe zum Leuchten gebracht wird. Der Widerstand der Kohlefäden ist ein sehr hoher, so dafs auch bei höheren Spannungen nur schwache Ströme durch diese Lampen hindurchgehen. Durch verschiedene Bemessung von Länge und Dicke des Kohlefadens kann man Lampen von verschiedener Hellgkeit für gegebene Spannungen herstellen. Um eine Helligkeit zu erzielen,

die gleich derjenigen einer Normalkerze ist (319), ist durchschnittlich ein Aufwand von 3 Watt erforderlich. Die gebräuchlichsten Lampen haben eine Helligkeit von 16 Normalkerzen, erfordern also ca. 50 Watt. Bei einer Spannung von 110 Volt, wie sie bei elektrischen Centralen vielfach angewandt wird, mufs also ein Strom von $^{50}/_{110} = 0{,}45$ Amp. durch die Lampe hindurchgehen, oder die Lampe mufs in heifsem Zustande einen Widerstand von $^{110}/_{0{,}45} =$ 242 Ohm haben; im kalten Zustande ist der Widerstand erheblich gröfser (223).

Bei normalem Brennen leuchten die Kohlefäden in heller Gelbglut. Durch eine mäfsige Steigerung der Stromstärke kann man sie zu intensiver Weifsglut bringen; aber die Kohlefäden vertragen eine solche höhere Beanspruchung nicht. Sie zerstäuben und brennen bald durch, während eine Glühlampe bei normaler Beanspruchung ca. 600 Brennstunden aushält. Einen Fortschritt in dieser Beziehung stellt die von Nernst erfundene Glühlampe dar. Bei ihr besteht der Glühkörper aus einer feuerbeständigen Masse nach der Art derjenigen, die in den Glühstrümpfen des Gasglühlichtes Verwendung findet. Da dieser Glühkörper an der Luft nicht verbrennt, braucht er auch nicht in eine luftleere Hülle eingeschlossen zu werden, sondern wird nur mit einer Glasglocke als Schutzhülle umgeben. Aber das Material dieser Glühstäbchen hat die unbequeme Eigenschaft, dafs es im kalten Zustande ein Isolator ist, und nur in heifsem Zustande den Strom durchläfst. Die Lampen bedürfen daher, damit sie anbrennen, eines Vorwärmers. Bei der in Fig. 195 abgebildeten Form der Nernstlampe geht der Strom zunächst durch die mit feinem Draht umwickelte Spirale; diese erglüht und erwärmt das in ihrer Mitte angebrachte eigentliche Glühstäbchen, das nach kurzer Zeit (20 Sekunden) glühend und dadurch leitend wird und nun vom Strom zu heller Weifsglut erhitzt wird. Im Oberteil der Lampe ist eine Vorrichtung nach Art eines Relais (248) angebracht, die den Strom in der Erwärmungsspirale in dem Augenblicke ausschaltet, in dem der Glühkörper leitend wird. Bei der abgebildeten Form der Nernstlampe geht bei 110 Volt ein Strom von 0,9 Ampère durch das Glühstäbchen und erzeugt eine Helligkeit von 65 Normalkerzen. Der für Erzeugung der Helligkeitseinheit erforderliche Wattverbrauch ist daher für die Nernstlampe nur halb so grofs (1,6 Volt für die Normalkerze) wie für die Glühlampe mit Kohlefaden.

236. **Davys Flammenbogen.** Als Davy (1821) Kohlenstäbchen, welche er mit den Polen einer starken Batterie verbunden hatte, zuerst in Berührung brachte und dann ein wenig voneinander entfernte, sah er dieselben mit blendend weifsem Lichte erglänzen und zwischen ihnen gleich einer Flamme einen weniger hellen Lichtstrom übergehen, welcher, wenn die Verbindungslinie der Kohlenpole horizontal liegt, die Form eines nach oben gewölbten Bogens annimmt,

und daher „Voltascher Bogen“ genannt wurde. Der Flammenbogen, welcher eine leitende Brücke zwischen den bis zur Weifsglut erhitzten Kohlenspitzen herstellt und sich wie ein beweglicher Stromleiter verhält, wird gebildet durch heifse mit Verbrennungsgasen und Dämpfen gemischte Luft und glühende Kohlenteilchen, die sich von beiden Polen, vorzugsweise aber von dem stärker erhitzten positiven Pole, losreifsen; die Folge davon ist, dafs die positive Kohle sich abstumpft und sogar aushöhlt, während die negative ihre zugespitzte Form behält (Fig. 196). Da aufserdem beide Kohlen an ihren glühenden Enden verbrennen, so werden sie nach und nach aufgezehrt, die positive Kohle jedoch schneller als die negative und zwar erfahrungsgemäfs etwa doppelt so rasch als diese. Der Flammenbogen setzt dem Durchgang des Stromes einen Widerstand entgegen, der um so beträchtlicher wird, je mehr sich der Abstand der Kohlenspitzen infolge ihrer Aufzehrung vergröfsert; die Stärke des Stromes nimmt daher ab, bis derselbe nicht mehr im stande ist, den Flammenbogen zu bilden; dann wird der Strom unterbrochen und das Licht erlischt. Will man daher das elektrische Kohlenlicht oder „Bogenlicht“ zur Beleuchtung verwenden, so mufs man dafür sorgen, dafs die Kohlenspitzen selbstthätig stets in der richtigen Entfernung voneinander erhalten werden. Vorrichtungen, welche diesen Zweck erfüllen, nennt man Bogenlicht-Regulatoren oder Bogenlampen. Von ihrer Einrichtung kann erst späterhin die Rede sein.

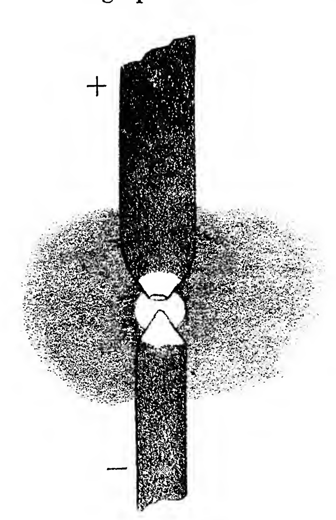


Fig. 196.
Flammenbogen.

Um den Lichtbogen zu unterhalten, ist eine Spannung erforderlich, die nicht unter 40 Volt betragen darf. Die gewöhnlichen Bogenlampen brennen mit 6—8 Ampère; sie bedürfen dazu einer Spannung von etwa 44 Volt und geben eine Lichtstärke von 700—950 Normalkerzen. Danach würde man zur Erzeugung der Helligkeitseinheit bei den Bogenlampen nur eines Aufwandes von ca. 0,4 Watt bedürfen. Der „Nutzeffekt“ der Bogenlampen ist also ein bedeutend höherer, als der der Glühlampen. Aber sie haben den Nachteil, dafs sich kleine Lichtmengen mit ihnen gar nicht herstellen lassen.

237. **Thermoelektricität.** Im Jahre 1821 entdeckte Seebeck d. Ält., dafs durch Wärme ein elektrischer Strom erzeugt werden kann. Lötet man nämlich einen Bügel *mn* (Fig. 197) von Kupfer an einen Wismutstab *op* und erwärmt die eine Lötstelle *o* oder

kühlt die andere *p* ab, so zeigt eine innerhalb des so gebildeten Vierecks auf einer Spitze schwebende Magnetnadel *a* durch ihre Ablenkung an, dafs ein elektrischer Strom entstanden ist, welcher das Viereck umkreist und an der wärmeren Lötstelle vom Wismut zum Kupfer, an der kälteren vom Kupfer zum Wismut übergeht. Man nennt diesen durch Wärme erzeugten Strom einen thermoelektrischen oder Thermostrom. Wird der Wismutstab durch einen Antimonstab ersetzt, so geht der thermoelektrische Strom an der wärmeren Lötstelle vom Kupfer zum Antimon. Prüft man in dieser Weise die verschiedenen Metalle, so findet man, dafs sich dieselben in eine Reihe, die thermoelektrische Spannungsreihe, derart ordnen lassen, dafs an der wärmeren Berührungsstelle der thermoelektrische Strom von dem in der Reihe höher stehenden Metall zu

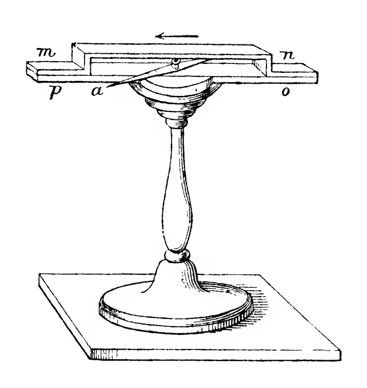



Fig. 197.
Geschlossenes thermoelektrisches Element.

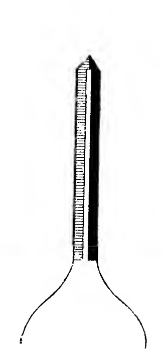


Fig. 198.
Offenes Thermoelement.

dem tiefer stehenden übergeht; diese Reihe ist: Wismut, Nickel, Quecksilber, Platin, Blei, Kupfer, Gold, Silber, Zink, Eisen, Antimon. Einige Schwefel- und Arsenmetalle, sowie einige Oxyde, z. B. Kupferkies, Arsenikkies, Bleiglanz, Braunstein u. s. w. stehen noch über dem Wismut, eine Legirung aus 2 Teilen Antimon und 1 Teil Zinn noch unter dem Antimon. Bei gleichem Temperaturunterschied der Lötstellen ist der dadurch hervorgerufene Spannungsunterschied um so gröfser, je weiter die beiden Metalle in der Spannungsreihe voneinander abstehen.

Für kleinere Temperaturdifferenzen ist die elektromotorische Kraft diesen Differenzen proportional. Bei gröfseren Temperaturunterschieden dagegen zeigt sich die thermoelektromotorische Kraft von der absoluten Temperatur abhängig; die Metalle ändern ihre Stellung in der Reihe und kehren sie sogar um, indem bei einer bestimmten Temperatur, dem neutralen Punkt, die elektromotorische Kraft Null und darüber hinaus entgegengesetzt wird.

**Einen aus zwei miteinander verlöteten Metallen gebildeten Stromkreis wie Fig. 197 nennt man ein geschlossenes thermoelektrisches**

Element oder Thermoelement. Zwei Stäbchen aus verschiedenen Metallen, z. B. Wismut und Antimon, welche blofs an einem Ende zusammengelötet sind, während die freien Enden Leitungsdrähte tragen, bilden ein offenes Thermoelement, Fig. 198, das zu einem geschlossenen wird, wenn man die Leitungsdrähte miteinander in leitende Verbindung bringt. Die Spannung wird verstärkt ($n$ mal so grofs), wenn man mehrere ($n$) Elemente nach Art der Voltaschen Säule zu einer thermoelektrischen Säule oder Thermosäule (Nobili, 1831) Fig. 199, verbindet; mehrere Stäbchen, deren Zwischenräume mit einer nichtleitenden Masse ausgefüllt sind, werden, zu einem Bündel vereinigt, in eine Fassung $P$ (Fig. 200) gebracht, so dafs ihre Endstäbchen mit den Klemmen $x$ und $y$ leitend verbunden sind. Eine solche Thermosäule in Verbindung mit dem Multiplikatordraht eines Galvanometers wird Thermomultiplikator (Melloni, 1841) genannt, und bildet ein empfindliches Mittel zum Nachweis und zur

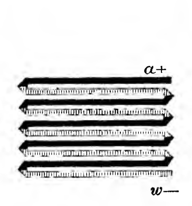


Fig. 199.
Zur Thermosäule.

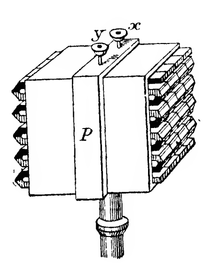


Fig. 200.
Thermosäule.

Messung geringer Wärmewirkungen, besonders für strahlende Wärme. Bei gröfseren Thermosäulen, die galvanische Batterien ersetzen sollen, wird die eine Reihe der Lötstellen durch Gasflammen erwärmt, die andere Reihe durch Wasser oder Eis oder auch durch blofse Ausstrahlung abgekühlt (Marcus, 1864; Noë, 1870; Clamond, Gülcher).

238. **Peltiersche Wirkung.** Peltier hat 1834 gefunden, dafs ein galvanischer Strom, welcher durch ein Thermoelement geleitet wird, an der Lötstelle eine Temperaturveränderung hervorbringt, welche derjenigen entgegengesetzt ist, die einen Thermostrom von gleicher Richtung erzeugen würde. Geht z. B. der galvanische Strom von Wismut zu Antimon, so kühlt sich die Lötstelle ab; sie erwärmt sich dagegen, wenn der Strom von Antimon zu Wismut übergeht. Man nennt diese nur an der Lötstelle auftretende, im ersteren Falle verbrauchte, im letzteren erzeugte Wärme die Peltiersche Wärme, zum Unterschied von der gewöhnlichen Stromwärme, die überall im Stromkreis auftritt, und, weil sie dem Jouleschen Gesetze gehorcht, auch „Joulesche Wärme“ genannt wird. Während die Joulesche Wärme dem Quadrate der Stromstärke proportional ist, ist die

Peltiersche Wärme einfach der Stromstärke proportional; während jene von der Richtung des Stromes nicht abhängt, ist diese positiv (Erwärmung) oder negativ (Abkühlung), je nachdem der Strom in der einen oder in der entgegengesetzten Richtung fliefst.

Man kann die Peltiersche Wirkung durch folgenden Versuch direkt nachweisen. Durch die beiden Glaskugeln eines Differential-Luftthermometers geht ein Metallstab, bestehend aus einem Antimonstäbchen, an welches zu beiden Seiten Wismutstäbchen angelötet sind, so dafs die Lötstellen sich in den Mitten der Kugeln befinden. Sendet man einen Strom durch den Metallstab, so wird die in beiden Kugeln in gleicher Weise entwickelte Joulesche Wärme durch die Peltiersche Wirkung in der einen Kugel vermehrt, in der anderen vermindert, und die Flüssigkeit in der U-förmig gebogenen Glasröhre, welche die beiden Kugeln verbindet, mufs anf jener Seite sinken, auf dieser um ebensoviel steigen. Lenz brachte in ein kleines Loch an der Lötstelle eines Wismut-Antimonstabes etwas Wasser und kühlte die Stange durch Eis auf 0° ab; wurde nun ein Strom durch die Lötstelle vom Wismut zum Antimon geleitet, so gefror das Wasser in wenigen Minuten. Einen indirekten Nachweis liefert das Peltiersche Kreuz (Fig. 201), ein Wismut- und ein Antimonstab, die mit ihren Mitten kreuzweis aufeinander gelötet sind. Leitet man den Strom eines galvanischen Elements durch das eine Paar der Kreuzesarme von Wismut zu Antimon, so zeigt nach Ausschaltung des Elements ein mit den beiden anderen Armen verbundenes Galvanometer einen Thermostrom an, der vom Antimon zum Wismut geht, also einer Abkühlung der Lötstelle entspricht.

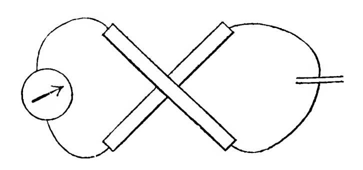


Fig. 201.
Peltiers Kreuz.

Jeder durch ein Thermoelement gehende Strom, also auch der Thermostrom selbst, ruft hiernach, indem er die wärmere Lötstelle abkühlt und die kältere erwärmt, einen Thermostrom von entgegengesetzter Richtung hervor, der den ursprünglichen Strom schwächt, oder die Peltiersche Wirkung erzeugt eine elektromotorische Gegenkraft, ähnlich wie die chemische Wirkung in einem galvanischen Element die Gegenkraft der Polarisation hervorruft. Es wird hierbei fortwährend Wärme von der wärmeren zur kälteren Lötstelle übergeführt, und damit ein Thermostrom in gleichmäfsiger Stärke fortdauere, mufs die eine Lötstelle durch Zufuhr von Wärme auf einer konstanten höheren, die andere Lötstelle durch Entziehung von Wärme

auf einer konstanten niedrigeren Temperatur erhalten werden. Der Unterschied dieser Wärmemengen verwandelt sich in Stromarbeit und erscheint im gesamten Stromkreis als Joulesche Wärme. Es bestätigt sich also auch hier der Satz, daſs, wenn Wärme in Arbeit verwandelt werden soll, eine entsprechende Wärmemenge von einem wärmeren in einen kälteren Körper übergehen muſs.

239. **Elektromagnete.** Bald nach Oersteds Entdeckung der Ablenkung der Magnetnadel beobachtete Arago (1820), daſs der kupferne Schlieſsungsdraht einer galvanischen Batterie sich ringsum mit Eisenfeilspänen bedeckte, wenn er in dieselben getaucht wurde, sie aber sofort wieder fallen lieſs, wenn der Strom unterbrochen wurde. Eisenstäbchen wurden in der Nähe eines Stromes magnetisch, solange der quer über sie geleitete Strom dauerte, Stahlnadeln wurden bleibend magnetisch. Eine weit kräftigere Wirkung wird erzielt, wenn der mit Seide oder Wolle umsponnene oder sonstwie isolirte Kupferdraht um einen Stab aus weichem Eisen vielfach herumgewunden (Sturgeon, 1825) und nun der Strom durch die Drahtwindungen geleitet wird; der Eisenstab wird sofort zu einem starken Magnet und vermag nun Eisen anzuziehen und festzuhalten; er verliert aber seine magnetischen Eigenschaften fast vollständig und läſst das angezogene Eisen wieder los, wenn man den Strom unterbricht. Ein solcher mit Drahtwindungen umgebener Eisenkern, den man durch Schlieſsen und Öffnen des Stromes nach Belieben magnetisch und wieder unmagnetisch machen kann, heiſst ein Elektromagnet. Statt den Draht unmittelbar auf den Eisenkern zu wickeln, erscheint es zweckmäſsiger, denselben auf eine Spule, Magnetisirungsspirale aufzuwinden, in deren Höhlung man den Eisenstab hineinschiebt. Damit die beiden Pole nebeneinander zu liegen kommen und sich in ihrer Wirkung gegenseitig unterstützen, gibt man dem Elektromagnet die Gestalt eines Hufeisens (*abc*, Fig. 202), auf dessen Schenkel die Drahtspulen *a* und *c* aufgeschoben sind; an dem eisernen Anker *de*, der die Pole verbindet und den Elektromagnet „schlieſst“, ist behufs Erprobung der Tragkraft eine zur Aufnahme der Gewichte bestimmte Wagschale angehängt. Durch Elektromagnete kann man Tragkräfte erzielen, welche alles durch Stahlmagnete in dieser Hinsicht geleistete weit übertreffen.

Stahlstäbe, in die Magnetisirungsspirale gebracht, werden ebenfalls stark magnetisch, behalten aber nach Unterbrechung des Stromes einen beträchtlichen Anteil dauernden Magnetismus. Man kann also auf diese Weise permanente Stahlmagnete herstellen. Das beste Verfahren zur Herstellung starker Stahlmagnete besteht jedoch darin, daſs man mit der einen Hälfte des Stahlstabes von der Mitte angefangen 10 bis 20 mal über den Nordpol, mit der anderen Hälfte ebenso oft über den Südpol eines kräftigen Elektromagnets streicht, wodurch an jenem Ende ein Südpol, an diesem ein Nordpol entsteht.

Die Magnetisirung durch den Strom erklärt sich auf Grund der bereits früher gewonnenen Anschauung (134), daſs die kleinen Teilchen auch des unmagnetischen Eisens und Stahls um ihren Schwerpunkt drehbare Magnetchen sind, die jedoch, ganz regellos gelagert, nach auſsen keine Wirkung üben können. Durch den in jeder Drahtwindung flieſsenden Strom werden die Magnetchen nach der Ampèreschen Regel so gedreht, daſs sich ihre Achsen senkrecht zur Ebene der Drahtwindungen, also parallel zur Achse des Eisenstabes richten, derart, daſs ihre Nordpole zur Linken der mit dem Strome schwimmenden und gegen den Eisenkern blickenden Figur liegen. Dadurch, daſs die Mole-

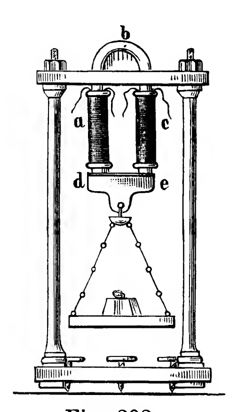


Fig. 202.
Elektromagnet in Hufeisenform.

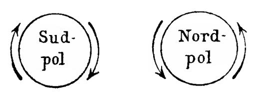
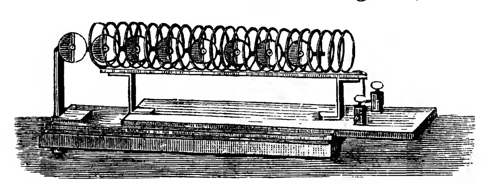


Fig. 203.
Stromrichtung an den Polen.

kularmagnetchen jetzt sämtlich oder wenigstens zum Teil in dieser Weise geordnet sind, ist der Stab zu einem Magnet geworden, dessen Nordpol zur Linken des Ampèreschen Schwimmers liegt, oder, was dasselbe ist, der seinen Südpol an jenem Ende hat, von wo aus gesehen der Strom in der Richtung des Uhrzeigers kreist (Fig. 203). — Man kann diesen Vorgang versinnlichen durch eine Reihe kleiner um ihre Mitte drehbarer Magnete, welche zur Hälfte (dem Nordpol


Fig. 204.
Modell der Molekularmagnete.

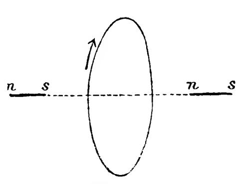


Fig. 205.
Kreisstrom.

entsprechend) schwarz gefärbte Papierscheiben tragen, und durch die Windungen des sie umgebenden Schraubendrahtes hindurch weithin sichtbar sind (Fig. 204). Anfangs ungeordnet, richten sie sich, wenn ein Strom durch die Spirale geschickt wird, mit ihren schwarzen Hälften nach der einen Seite, und kehren ihre Lage um, wenn der Strom umgekehrt wird.

Der höchste Grad der Magnetisirung oder die „Sättigung“ ist erreicht, wenn sämtliche Molekularmagnete in dieser Weise gerichtet sind. Bei allmählich zunehmender Stromstärke wächst der Magne-

tismus anfangs nahezu proportional der Stromstärke, später aber bei Annäherung an die Sättigung immer langsamer; ist diese erreicht, so vermag auch eine noch so grofse Stromstärke die Magnetisirung nicht mehr höher zu steigern.

Wenn man einen Eisenkern in einer Magnetisirungsspule durch einen allmählich ansteigenden Strom magnetisirt und dann durch langsame Schwächung des Stromes wieder entmagnetisirt, so findet man, dafs den gleichen Stromstärken bei der Entmagnetisirung eine höhere Magnetisirung des Eisenstabes entspricht, als bei der Magnetisirung. Ist der Strom wieder auf Null gesunken, so ist der Kern noch etwas magnetisch, und man mufs, um ihn ganz zu entmagnetisiren, einen Strom von gewisser Stärke in umgekehrter Richtung durch die Spule schicken. Dieses Zurückbleiben des Magnetismus bei auf- und absteigender Magnetisirung bezeichnet man als „Hysteresis“. Sie ist eine Erscheinungsform der Koërcitivkraft, die auch im weichen Eisen, wenn auch nur in geringem Grade, vorhanden ist.

Im Augenblicke der Magnetisirung erleidet ein Eisenstab eine kleine Verlängerung und läfst dabei einen Ton vernehmen. Sein Volumen aber bleibt unverändert.

Beim Magnetisiren und Entmagnetisiren, namentlich bei rasch hintereinander folgenden Wiederholungen dieses Vorganges erwärmt sich der Stab, indem die Koërcitivkraft wie eine Art innerer Reibung wirkt.

240. **Solenoide.** Durch einen Kreisstrom wird eine Magnetnadel, auch wenn ihr Drehpunkt nicht im Mittelpunkt des Kreises liegt (wie dies bei der Tangentenbussole der Fall ist), sondern z. B. irgendwo auf der Geraden, die auf der Ebene des Kreises in dessen Mittelpunkt senkrecht steht (Achse des Kreisstromes), nach der Ampèreschen Regel stets so abgelenkt, dafs ihr Südpol sich nach der Seite wendet, von welcher aus gesehen der Strom in der Richtung des Uhrzeigers (rechtsherum) kreist, und sie stellt sich in die genannte Gerade ein, also senkrecht zum Kreisstrom, wenn sie der Wirkung des Erdmagnetismus entzogen ist (Fig. 205). Der Kreisstrom wirkt also auf die Magnetnadel gerade so, wie ein kurzes Magnetstäbchen, das man sich in seinem Mittelpunkt senkrecht zu seiner Fläche durch ihn hindurchgesteckt denkt, und welches seinen Südpol nach der in der Richtung des Uhrzeigers umflossenen Seite kehrt; oder auch, der Kreisstrom verhält sich einem Magnet gegenüber so, als ob seine Fläche auf dieser Seite südmagnetisch, auf der entgegengesetzten nordmagnetisch wäre (magnetische Doppelfläche).

Die Wirkung auf die Magnetnadel wird verstärkt, wenn man eine Anzahl von Kreisströmen, die in gleichem Sinne fliefsen, mit ihren Mittelpunkten längs einer gemeinschaftlichen Achse aufreiht. Eine solche Anordnung, welche Ampère „Solenoid“ (von *σωλήν*, Röhre) nannte, entspricht in ihrer Wirkung einer Reihe von kleinen Magneten, welche ihre gleichnamigen Pole alle nach derselben Seite kehren, und verhält sich daher wie ein Magnet, der seinen Südpol an dem in der Richtung des Uhrzeigers umströmten Ende hat.

Ein Solenoid wird sehr nahe verwirklicht durch einen einzigen

spiralförmig gewundenen oder auf eine Spule gewickelten Draht (Fig. 206). Ein frei beweglicher Magnetstab wird von einem Solenoidpol abgestofsen oder angezogen, je nachdem der nähere Magnetpol mit jenem gleichnamig oder ungleichnamig ist; im letzteren Falle wird der Magnet in die Spirale hineingezogen, bis seine Mitte mit derjenigen des Solenoids zusammenfällt, mit einer Kraft, die einerseits der Stärke des Magnetismus, andererseits der Stromstärke proportional ist. Ein Stab weichen Eisens wird unter dem Einflufs der genäherten Spirale ein Elektromagnet, dessen näherer Pol ungleichnamig ist, und wird daher stets in dieselbe hineingezogen. Da bei einem Elektromagnet die Stärke des erregten Magnetismus (für schwächere Ströme) der Stromstärke proportional ist, so ist die Kraft, mit welcher er in die Spule hineingezogen wird, dem Quadrate der Stromstärke proportional.

Macht man den Magnet fest und den Stromleiter beweglich, so wird der letztere, wegen der Gleichheit von Wirkung und Gegenwirkung, in Bewegung gesetzt. Unter dem Einflufs der Erde stellt

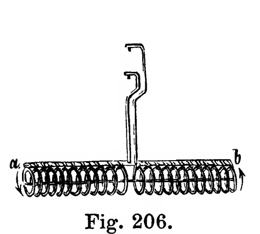



Fig. 206.
Solenoid.

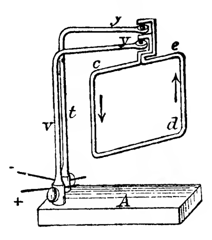



Fig. 207.
Ampèresches Gestell.

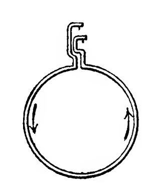


Fig. 208.
Kreisförmiger Stromleiter.

sich ein drehbar aufgehängter Kreisstrom oder Schraubendraht mit seiner Achse in den magnetischen Meridian ein, die rechtsherum umströmte Seite gegen Süden gekehrt, und verhält sich einem genäherten Magnet gegenüber ganz so, als wäre er selbst ein Magnet.

Um Stromleiter drehbar aufzuhängen, bedient man sich des Ampèreschen Gestells (Fig. 207). Die beiden auf dem Brettchen $A$ stehenden Messingsäulen $v$ und $t$, welche oben rechtwinklig umgebogen sind, tragen an ihren Enden stählerne, mit Quecksilber gefüllte Näpfchen $y$ und $y'$, von denen das erstere gerade unter dem letzteren liegt. Der Stromleiter, z. B. der zu einem Rechteck gebogene Draht $cde$ (oder der Kreisstrom, Fig. 208, oder das Soleonid, Fig. 206) aus Kupfer oder besser aus dem leichteren Aluminium wird mittels Stahlspitzen, die an seinen Enden angelötet sind, in die Quecksilbernäpfchen eingehängt, so dafs er sich um die von den beiden Spitzen gebildete Achse mit Leichtigkeit drehen kann.

241. **Magnetfeld um einen Strom.** Jeder Strom erzeugt um sich ein eigentümliches Magnetfeld. Ein senkrecht zur Ebene der Zeichnung Fig. 209 aus ihrer Mitte aufsteigender langer geradliniger Strom stellt nach der Ampèreschen Regel eine kleine drehbare, dem

Einflufs des Erdmagnetismus entzogene, Magnetnadel überall senkrecht zu der durch den Stromleiter und die Mitte der Nadel gelegten Ebene, und zwar so, dafs der Nordpol der Nadel nach der Linken des mit dem Strome schwimmenden Beschauers weist. Eine grofse Anzahl sehr kleiner Magnetnadeln, die gleichweit vom Stromleiter entfernt sind, müssen sich daher um den Stromleiter längs einer Kreislinie ordnen, welche eine Kraftlinie des durch den Strom geschaffenen Magnetfeldes ist. Die den Stromleiter ringförmig umschliefsenden Kraftlinien werden sichtbar, wenn man auf ein Kartenblatt, durch welches der Draht senkrecht hindurchgesteckt ist, feine Eisenfeilspäne siebt; die Eisenspänchen werden unter dem Einflufs des Stromes kleine Elektromagnete und bilden rings um den Draht zusammenhängende Ringe (Fig. 210). Der oben (239) erwähnte Versuch von Arago beruht eben darauf, dafs um den in Eisenfeile ge-

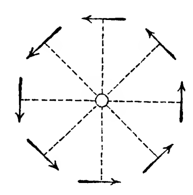


Fig. 209.
Magnetnadel um einen Strom.

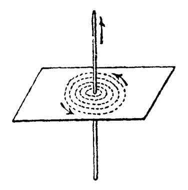


Fig. 210.
Magnetische Kraftlinien um einen geradlinigen Strom.

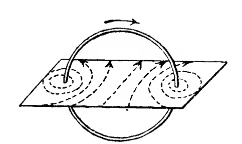


Fig. 211.
Kraftlinien um einen Kreisstrom.

tauchten Leitungsdraht die magnetisch gewordenen Eisenteilchen sich zu Ringen zusammenschliefsen. Als Niveauflächen gehören zu diesen kreisförmigen Kraftlinien die durch den geradlinigen Stromleiter gelegten Ebenen.

Die Figuren 211 und 212 zeigen in derselben Weise durch Eisenfeile dargestellt die Kraftlinien eines Kreisstromes und eines Solenoids. Man bemerkt die Ähnlichkeit des Magnetfeldes eines Solenoids mit demjenigen eines Magnetstabes. Während aber die Kraftlinien eines Magnetstabes von dem einen Pole ausgehen und in den anderen einmünden und gewissermafsen durch das Material des Stabes hindurch zurücklaufen, bilden die Kraftlinien eines Solenoids, wie diejenigen eines einzelnen Kreisstromes oder eines geraden Drahtes, geschlossene Kurven, indem sie durch den Innenraum des Solenoids in sich zurückkehren. Alle Kraftlinien, die das Solenoid durch den Aufsenraum von seinem einen zu seinem anderen Ende schickt, drängen sich im Innenraum des Solenoids zusammen. Hier ist daher das magnetische Feld, das den die Drahtwindungen durchfliefsenden Strom erzeugt, am stärksten. Dieses Feld im Innern eines Solenoids ist um so stärker, je gröfser die Stromstärke und je gröfser die Zahl der Windungen ist, die auf dem Centimeter der Spulenlänge enthalten sind. Man sagt, indem man die Stromstärke in Ampère ausgedrückt denkt, das magnetische Feld im Innern des Solenoids

ist gegeben durch die Zahl der Ampère-Windungen pro cm der Spulenlänge.

Die äquipotentialen Linien (233) einer vom Strom durchflossenen Platte sind zugleich die zur Strömung gehörigen Magnetkraftlinien. Man kann daher die Äquipotentiallinien sichtbar machen, indem man Eisenfeile auf die Platte siebt (Lommel, 1892).

242. **Elektromagnetische Drehung.** Betrachtet man die Wirkung eines geradlinigen Stromes auf einen einzigen Magnetpol, so müſste dieser den Stromleiter längs einer Kraftlinie umkreisen, für den mit dem Strom schwimmenden, nach dem Pole hinblickenden Beobachter rechtsherum oder linksherum, je nachdem der Magnetpol ein Süd- oder ein Nordpol ist. Diese Erscheinung läſst sich verwirklichen mittels des kleinen Apparats Fig. 213. Zwei parallele lotrechte Magnete $ns$ und $n_1s_1$, mit gleichnamigen Polen nach oben, sind durch Querstäbchen an einem Messingstück $d$ befestigt, das, oben mittels eines Fadens leicht drehbar aufgehängt, unten mit einer Platinspitze in ein mit Quecksilber gefülltes Näpfchen $b$ taucht. Das Näpfchen wird getragen von einem Metallstäbchen $ab$, das den Strom von $e$ her zuführt; ein horizontaler Draht $c$ mit abwärts gebogener

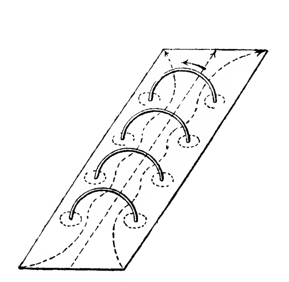


Fig. 212.
Kraftlinien um ein Solenoid.

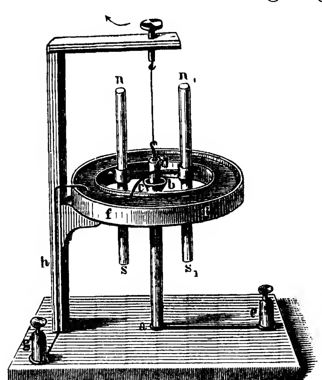



Fig. 213.
Drehung von Magneten um einen Strom.

Platinspitze, der an dem messingenen Mittelstück befestigt ist, führt den Strom weiter in eine kreisförmige mit Quecksilber gefüllte Holzrinne, von wo er durch einen Draht $h$ zum anderen Pole $g$ der Stromquelle zurückkehrt. Der in dem Metallsäulchen flieſsende Strom, der fast nur auf die unteren näheren Magnetpole wirkt, versetzt die Magnete in dauernde Rotation, deren Richtung mit derjenigen des Stromes sich umkehrt.

243. **Biot-Savartsches Gesetz.** Die Kraft, mit welcher ein geradliniger Stromleiter auf einen Magnetpol senkrecht zu der durch Strom und Magnetpol gelegten Ebene wirkt, nimmt selbstverständlich mit der Entfernung des Pols von dem Stromleiter ab. Wir betrachten nun einen vertikal aufsteigenden sehr langen geradlinigen Strom, der

die horizontal gedachte Zeichnungsebene (Fig. 214) im Punkte $A$ durchsetzt, und eine in dieser Horizontalebene liegende nach $A$ gerichtete Magnetnadel $ns$, welche an einem um $A$ drehbaren Hebelarm $An$ befestigt ist. Der Strom wirkt auf die Pole $n$ und $s$ mit den Kräften $f$ und $f'$, welche den Hebel nach entgegengesetzten Richtungen zu drehen streben. Da nun, wie leicht auch der Hebel drehbar sei und wie grofs auch die Stromstärke gewählt werde, eine Drehung nicht eintritt, so müssen die Drehungsmomente der beiden Kräfte einander gleich sein; es mufs also, wenn man die Entfernungen der gleichstarken Pole von dem Stromleiter, d. i. die Hebelarme $An$ und $As$, beziehungsweise mit $r$ und $r'$ bezeichnet, $fr = f'r'$ sein, oder, was dasselbe ist, es verhält sich $f:f' = r':r$, d. h. die Kraft, welche ein Strom auf einen Magnetpol ausübt, ist der Entfernung des letzteren von dem Stromleiter umgekehrt proportional.

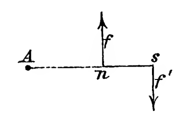


Fig. 214.
Biot-Savartsches Gesetz.

Dieses von Biot und Savart (1820) entdeckte Gesetz wurde von denselben noch weiter durch Versuche bestätigt, indem sie kurze dem Erdmagnetismus entzogene horizontale Magnetnadeln unter dem Einflufs eines langen vertikalen Stromes pendelartige Schwingungen ausführen liefsen, wobei sich ergab, dafs die Quadrate der Schwingungszahlen und folglich die beschleunigenden Kräfte den Entfernungen vom Stromleiter umgekehrt proportional sind. Es ergab sich dabei ferner, dafs die Kraft der Stromstärke und der Stärke des Magnetpols direkt proportional ist.

244. **Stromelemente.** Man kann sich einen linienförmigen Stromleiter in unzählig viele kleine Stückchen oder „Stromelemente" geteilt denken, und sich vorstellen, dafs seine Wirkung auf einen Magnetpol sich zusammensetze aus den Wirkungen aller dieser Stromelemente. Damit sich so bei einem sehr langen geradlinigen Stromleiter das Biot-Savartsche Gesetz ergebe, mufs man annehmen, dafs die Kraft, welche ein Stromelement von der Länge $\sigma$ bei der Stromstärke $i$ auf einen Magnetpol von der Stärke $m$ ausübt, dem Ausdruck (Laplace)

$$\frac{m\,\sigma\,i\sin\alpha}{r^2}$$

proportional, oder, bei geeigneter Wahl der Einheit der Stromstärke, diesem Ausdruck gleich sei, wenn $r$ die Länge der Verbindungslinie des Stromelements mit dem Pol und $\alpha$ den Winkel des Stromelements mit dieser Linie bedeutet.

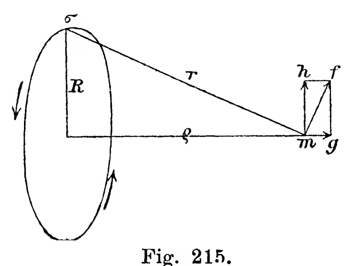


Fig. 215.
Wirkung eines Kreisstromes auf einen Magnetpol.

245. **Berechnung der Wirkung eines Kreisstromes auf einen Magnetpol.** Die Fig. 215 stelle in perspektivischer Ansicht einen kreisförmigen Strom vom Radius $R$ und der Stromstärke $i$ dar, der auf einen Magnetpol von der Stärke $m$ wirkt, welcher auf der im Mittelpunkt der Kreisfläche auf ihr errichteten Senkrechten um $\varrho$ von diesem Mittelpunkt, um $r$ von dem Elemente $\sigma$ des Kreisstromes entfernt liegt. Die Kraft $f$, welche das Stromelement $\sigma$ auf $m$ ausübt, steht senkrecht auf der durch $\sigma$ und

$m$ gelegten Ebene, also auch senkrecht auf $r$, und hat (da auch $\sigma$ auf $r$ senkrecht steht, und demnach $\alpha = 90^0$, $\sin\alpha = 1$ ist) die Gröfse:

$$f = \frac{m\,\sigma\,i}{r^2}.$$

Die Kraft $f$ läfst sich in zwei Komponenten $g$ und $h$ zerlegen, deren erstere in die Linie $\varrho$ fällt, die letztere zu dieser senkrecht steht. Letztere wird durch eine gleiche aber entgegengesetzt gerichtete Komponente, welche von dem diametral gegenüberliegenden Stromelement herrührt, aufgehoben, und es bleibt nur noch die Komponente $g$ wirksam. Da sich $g : f = R : r$ verhält, so ist

$$g = f \cdot \frac{R}{r} = \frac{m\,\sigma\,i\,R}{r^3}.$$

Die gesamte Kraft $K$, welche der ganze Kreisstrom auf $m$ in der Richtung nach $g$ ausübt, ist die Summe aller von sämtlichen Elementen des Kreisumfangs herrührenden Komponenten $g$, und ergibt sich, wenn man in dem Ausdruck für $g$ den ganzen Kreisumfang $2\pi R$ statt $\sigma$ einsetzt:

$$K = \frac{2\,m\,\pi\,i\,R^2}{r^3},$$

oder, da $\pi R^2 = F$ der Flächeninhalt des Kreises ist:

$$K = \frac{2\,m\,i\,F}{r^3}.$$

Nun hatten wir früher (147) gefunden, dafs die Kraft $K$, welche ein kurzer Magnetstab, dessen Moment $M$ ist, auf einen in seiner Verlängerung in der verhältnismäfsig grofsen Entfernung $r$ liegenden Magnetpol $m$ ausübt,

$$K = \frac{2\,m\,M}{r^3}$$

ist. Es ergibt sich also aus der Vergleichung der beiden letzteren Ausdrücke, dafs die Wirkung eines Kreisstromes auf einen Magnetpol ersetzt werden kann durch die Wirkung eines kurzen Magnetstabes, der senkrecht durch die Fläche des Stromkreises hindurchgesteckt ist, und dessen magnetisches Moment gleich ist dem Produkte der Stromstärke mit der Gröfse der umströmten Fläche $M = iF$.

246. **Absolute elektromagnetische Einheit der Stromstärke.** Mit Rücksicht auf die Gesetze der magnetischen Wirkung des Stromes wählte W. Weber (1842) als absolute Einheit der Stromstärke jenen Strom, welcher die Flächenheit ($1\ \text{cm}^2$) umfliefsend die Einheit des magnetischen Moments erzeugt, oder auch, was dasselbe ist, den Strom, der in einem Kreise vom Radius 1 (1 cm) durch die Bogenlänge 1 (1 cm) fliefsend auf die Einheit des Magnetismus (oder der Polstärke) im Mittelpunkt des Kreises die Kraft 1 (1 Dyne) ausübt, oder daselbst die magnetische Feldstärke 1 hervorbringt.

Zur Messung nach diesem absoluten Mafs dient die Tangentenbussole (218). Ist nämlich, wie es bei diesem Instrumente zutrifft, die Magnetnadel sehr klein im Verhältnis zum Radius des Stromkreises, so bleiben ihre Pole bei jeder Ablenkung nahezu im Mittelpunkt des Kreises, und die auf einen Pol von dem Kreisstrom ausgeübte Kraft ergibt sich aus der obigen Gleichung, wenn man $r = R$ setzt, zu

$$K = \frac{2\pi\,m\,i}{R};$$

ist ferner $H$ die Horizontalintensität des Erdmagnetismus, so ist die am Magnetpol parallel zum magnetischen Meridian wirkende Kraft $Hm$. Stellt sich die Nadel unter dem Ablenkungswinkel $\alpha$ ins Gleichgewicht, so ist

$$\frac{2\pi m i}{R}\cos\alpha = Hm\sin\alpha, \quad \text{oder} \quad i = \frac{HR}{2\pi}\operatorname{tg}\alpha.$$

Der Reduktionsfaktor der Tangentenbussole für absolutes Mafs ist demnach:

$$\frac{HR}{2\pi};$$

um ihn zu kennen, mufs man also die Horizontalintensität des Erdmagnetismus (in absolutem Mafse) am Beobachtungsort und den Radius des Kreises (in cm) messen.

Für die meisten Anwendungen ist jedoch die absolute Stromeinheit zu grofs; es hat daher der elektrische Kongrefs zu Paris im Jahre 1881 den zehnten Teil dieser Einheit als praktisches Strommafs festgesetzt und „Ampère“ genannt.

247. **Para- und Diamagnetismus.** Mit Hilfe von Elektromagneten kann man sehr viel stärkere magnetische Felder erzeugen, als mit Stahlmagneten. Durch Anwendung dieser kräftigen Wirkungen gelang es Faraday (1845) nachzuweisen, dafs nicht blofs Eisen, Kobalt und Nickel, sondern — allerdings in aufserordentlich verschiedenem Grade, — auch alle übrigen Stoffe von einem Magneten beinflufst werden. Dabei fand er, dafs sich alle Stoffe in zwei Klassen teilen lassen.

Bringt man ein Stäbchen von Wismut, das, an einem Coconfaden aufgehängt, wagrecht schwebt, zwischen die Pole eines sehr kräftigen Elektromagnets (Fig. 216; von oben gesehen), so wird es von beiden Polen abgestofsen und stellt sich rechtwinkelig zur Verbindungslinie $NS$ der beiden Pole, während ein Eisenstäbchen sich in die Verbindungslinie $NS$ der Magnetpole einstellt. Die Verbindungslinie der Pole eines Magnets wird bekanntlich seine Achse, eine in der Mitte der Achse zu ihr senkrecht gelegte Ebene sein Äquator genannt; man nennt daher die Stellung $ab$ die äquatoriale, die Stellung $NS$ die axiale. In Bezug auf ihre Einstellung zwischen den Magnetpolen lassen sich alle Körper in zwei Gruppen teilen: die magnetischen werden vom Magnet angezogen und stellen sich axial, die übrigen abgestofsen und stellen sich äquatorial; erstere wurden von Faraday paramagnetisch, letztere diamagnetisch genannt. Aufser Eisen, Nickel und Kobalt, deren magnetische Eigenschaften schon längst bekannt waren, erwiesen sich noch Mangan, Chrom, Cer, Titan, Osmium, Palladium, Platin und andere diesen verwandte Elemente, sowie fast alle Eisenverbindungen als paramagnetisch, als diamangnetisch dagegen vorzüglich Wismut, sodann Antimon, Zink, Blei, Silber, Kupfer, Gold und die meisten übrigen Körper.

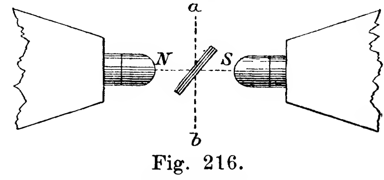


Fig. 216.
Diamagnetismus.

Dieses Verhalten erklärt sich durch die Annahme, dafs alle Körper im Magnetfeld magnetisch werden, die diamagnetischen jedoch

schwächer, als das umgebende Mittel, z. B. die Luft oder der leere Raum (Äther). Eine in eine Glasröhre eingeschlossene verdünnte Lösung von Eisenchlorid, die von Luft umgeben sich axial richtet, stellt sich, in eine stärkere Eisenchloridlösung getaucht, äquatorial, weil die stärkere Lösung mit gröfserer Kraft die axiale Lage einzunehmen strebt und die schwächere daraus verdrängt (nach Analogie des Archimedischen Prinzips). Die diamagnetischen Körper haben negative Magnetisirungszahlen (149), z. B. Wismut — 0,000014, Wasser — 0,0000008; ihre Permeabilität (145) ist geringer als die der Luft, sie sammeln die Kraftlinien nicht, sondern zerstreuen sie.

Auch Gase lassen Para- oder Diamagnetismus erkennen. Sauerstoff ist deutlich paramagnetisch; eine Kerzenflamme dagegen wird zwischen den Polen flach gedrückt und aus dem Felde herausgedrängt, weil die Flammengase diamagnetisch sind gegen die umgebende Luft.

248. **Elektromagnetische Telegraphie.** Die magnetischen Wirkungen des galvanischen Stromes, sowohl die Ablenkung der Magnetnadel als auch die Magnetisirung weichen Eisens, finden eine wichtige Anwendung zur schnellen Übermittelung von Signalen und Schriftzeichen in die Ferne (Telegraphie).

Auf der Ablenkung der Magnetnadel beruhen die Nadeltelegraphen; indem man nämlich durch eine Drahtleitung nach einer entfernten Station einen Strom schickt, woselbst er eine drehbar aufgestellte Magnetnadel in vielfachen Drahtwindungen umkreist, kann man je nach der Richtung, die man dem Strom gibt, die Nadel beliebig nach rechts oder nach links ablenken; aus den zwei Zeichen „rechts“ und „links“ lassen sich aber nach Übereinkunft alle Buchstaben und sonstigen Schriftzeichen zusammensetzen. Den ersten elektromagnetischen Telegraphen dieser Art haben Gaufs und Weber 1838 zwischen der Sternwarte und dem physikalischen Institut zu Göttingen eingerichtet. Auch in der unterseeischen Kabeltelegraphie erfolgt die Zeichengebung durch die Ablenkung des innerhalb einer Drahtrolle aufgehängten Magnetchens eines sehr empfindlichen Spiegelgalvanometers.

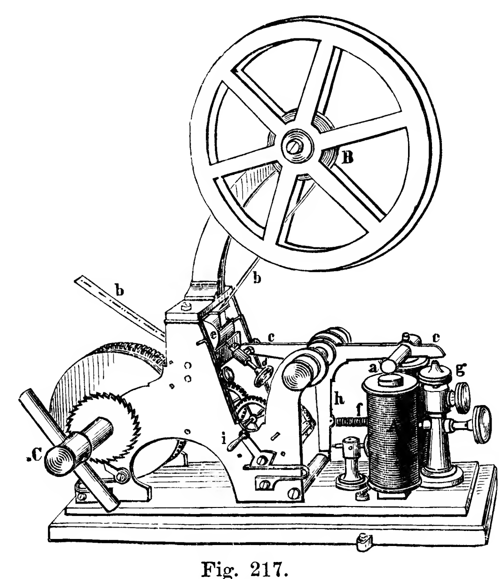


Fig. 217.
Stiftschreiber des Morseschen Telegraphen.

Andere elektromagnetische Telegraphen gründen sich auf die Anwendung von Elektromagneten; als Beispiel diene der noch gegenwärtig auf den meisten Telegraphenlinien in Gebrauch befindliche Zeichendrucktelegraph oder Stiftschreiber von Morse (1837). In Fig. 217 sind sind *AA* die beiden Schenkel eines Elektromagnets, über dessen Polen, von dem Messinghebel *cc* getragen, der eiserne Anker *a* schwebt; das andere Ende des Hebels trägt den stählernen Stift *d*, welcher, sobald der Anker von dem Elektromagnet angezogen wird, gegen den von der Rolle *B* sich abwickelnden Papierstreifen *bb* drückt, den ein Uhrwerk mit gleichförmiger Geschwindigkeit zwischen zwei Walzen hindurchzieht. Damit das Papier von dem Stift Eindrücke empfange, ist die obere Walze *e* ringsum mit einer seichten Rinne versehen. Beim Herabgehen stöfst das rechte Ende des Hebels gegen eine Schraube *g*, welche verhindert, dafs der Anker mit den Polen des Elektromagnets in Berührung komme und daran hafte. Erlischt nach Unterbrechung des Stromes der Magnetismus wieder, so zieht die Abziehfeder *f*, welche an dem Seitenarm *h* des Hebels *cc* wirkt, den Stift *d* wieder herab. Der Handgriff *C* dient zum Aufziehen des Uhrwerks, die Kurbel *i* zum Auslösen und Hemmen desselben. Zum Schliefsen und Öffnen des Stromes dient der Taster oder Schlüssel (Fig. 218), ein messingener Hebel *DE*, welcher in dem auf das Holzbrettchen *AA* geschraubten Messinglager *BC* drehbar ist. Dieses Lager steht mit der nach der nächsten Station führenden Telegraphenleitung in Verbindung, die Metallwarze *a* dagegen mit dem einen Pol der Batterie. Im Ruhezustand wird die Spitze *b*, durch die Feder *cc'* gegen den Metallkegel *b* gedrückt, und zwischen *a* und *a'* findet keine Berührung statt. Bringt man aber durch einen Druck auf den Griff *F* die Metallwarzen *a* und *a'* in Berührung, so geht der Strom auf dem Weg *aa' BC* durch die Drahtleitung um den Elektromagnet der anderen Station und der emporgehobene Stift desselben prägt auf den durch das Uhrwerk vorübergeführten Papierstreifen einen vertieften Punkt oder Strich, je nachdem der Taster nur einen Augenblick oder etwas länger niedergedrückt wird. Aus Punkten und Strichen läfst sich das ganze Alphabet zusammensetzen.

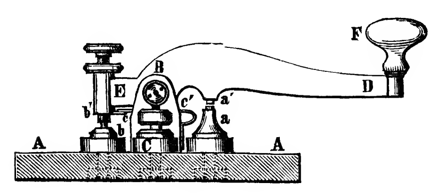


Fig. 218.
Schlüssel des Morseschen Telegraphen.

Die neueren Apparate haben statt des Stiftes *d* ein drehbares Rädchen, das mit seinem Rande in eine Farblösung taucht und beim Druck gegen den Papierstreifen farbige Striche und Punkte zeichnet (Farbschreiber).

Bei den frühesten Telegraphenanlagen waren für den Betrieb eines Zeichengebers stets zwei Drähte nötig, um den Strom nach der entfernten Station hin und wieder zurückzuführen; 1838 aber machte

Steinheil die Entdeckung, dafs der zweite Draht erspart werden könne, indem man Kupferplatten an die Enden der Leitung lötet und in die Erde versenkt (Bodenleitung). Ist eine galvanische Batterie in die Leitung geschaltet, so fliefsen von ihren Polen die entgegengesetzten Elektricitäten durch die Kupferplatten in die Erde, um in ihr wie in einem grofsen Behälter zu verschwinden, und in dem Draht kommt der Strom ganz ebenso zu stande, als wenn die Leitung geschlossen wäre und die Erde den fehlenden Teil des Schliefsungskreises bildete.

Damit zwischen zwei Stationen die Korrespondenz nach beiden Richtungen möglich sei, mufs jede derselben sowohl mit einem Zeichengeber (Schlüssel) als auch mit einem Zeichenempfänger (z. B. Stiftschreiber) ausgerüstet sein. Der Stromlauf zwischen zwei Morsestationen ist in Fig. 219 angedeutet. Wird der Schlüssel *c* der absendenden Station niedergedrückt, so geht der Strom von der Batterie *b* aus über *c* in die Leitung, durch den ruhenden Schlüssel *c'* der Empfangsstation um den Elektromagnet *a'* des dortigen Schreib-

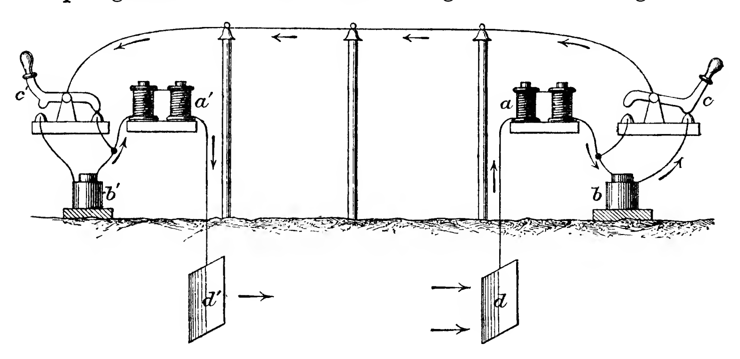



Fig. 219.
Stromlauf zwischen zwei Morsestationen.

apparats, sodann in die Erde nach der Bodenplatte *d'* und von der Bodenplatte *d* um den diesseitigen Elektromagnet *a* zum anderen Pol der Batterie zurück. Einer besonderen Alarmvorrichtung bedarf der Morse-Apparat nicht; das Klappern des Ankers genügt, um den Telegraphisten der Empfangsstation aufmerksam zu machen und zum Auslösen des Uhrwerks zu veranlassen.

In Wirklichkeit hat man sich indes unter den Elektromagneten der Fig. 219 nicht diejenigen der Schreibapparate selbst, sondern diejenigen der „Übertrager“ vorzustellen. Durch den grofsen Widerstand der langen Leitung wird nämlich der von der Abgangsstation kommende „Linienstrom“ zu sehr geschwächt, um den Schreibhebel mit der erforderlichen Kraft zu bewegen; der Linienstrom wird daher nur dazu benutzt, um einen Elektromagnet *C* (Fig. 220) mit sehr leicht beweglichem Anker *a* zu erregen; indem der angezogene Anker den Hebelarm *bc* gegen die Schraube *d* drückt, schliefst er die an der Empfangsstation aufgestellte Ortsbatterie (Lokalbatterie) *A* und

sendet deren kräftigen Strom durch die Windungen des die Zeichen wiedergebenden Elektromagnets *B*. Diese von Wheatstone 1839 angegebene Einrichtung wird Übertrager oder Relais (Vorspann) genannt.

249. **Wagnerscher Hammer.** Der magnetische Hammer (Wagner, 1839), eine Vorrichtung zur selbstthätigen Unterbrechung und Wiederschliefsung des Stromes, ist in Fig. 221 dargestellt. Der Strom geht von der galvanischen Batterie zur Klemmschraube *a*, durch einen Metallstreifen zur Messingssäule *b*, durch eine Platinspitze auf ein kleines Platinblech, welches auf die Messingfelder *p* gelötet ist, von hier in die Messingsäule *d*, von da durch die zwischen *d* und *e* eingeschaltete Leitung, in der die Stromunterbrechungen erfolgen sollen, umkreist sodann die Drahtwindungen des Elektromagnets *M* und fliefst über *f* nach dem negativen Pole

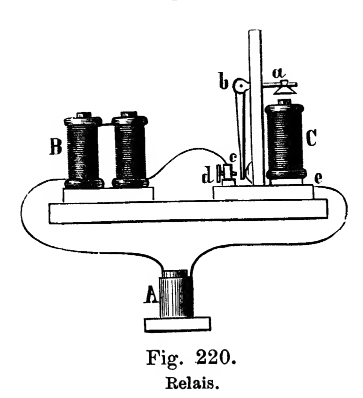


Fig. 220.
**Relais.**

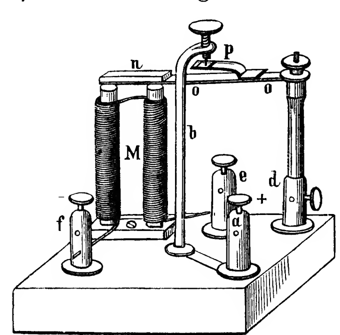


Fig. 221.
**Magnetischer Hammer.**

der Batterie zurück. Sobald aber der Strom durch die Windungen des Elektromagnets geht, wird dieser magnetisch, zieht den auf der Messingfeder *oo* befestigten eisernen Anker *n* an und bewirkt durch Herabbiegen dieser Feder eine Unterbrechung des Stromes bei der Platinspitze. Infolgedessen erlischt der Magnetismus der Eisenkerne des Elektromagnets, die Felder schnellt zurück, stellt die Schliefsung bei *p* wieder her, worauf sich das nämliche Spiel unter raschen Schwingungen der Feder wiederholt.

250. **Elektrische Klingel.** Die elektrische Klingel besteht aus einem magnetischen Hammer, dessen Feder an ihrem freien Ende einen Klöppel trägt, der in raschen Schwingungen an eine Glocke schlägt, sobald und solange durch Drücken auf eine Taste ein Strom durch die Drahtleitung gesendet wird. In Fig. 222 ist die Anordnung der Leitung für einen elektrischen Klingelzug angedeutet. Vom Pol *C* der Batterie *A C* geht der Leitungsdraht nach dem Läutewerk *B* und setzt sich, aus demselben heraustretend, durch alle jene Räume fort, in welchen Drücker zum Klingeln angebracht werden sollen; ein vom anderen Pol *A* kommender Draht läuft parallel und isolirt neben jenem her. Von jedem dieser beiden

parallelen Drähte geht ein Ausläufer zu jedem Drücker, so dafs von allen diesen Stellen aus der Strom geschlossen und somit das Läutewerk in Thätigkeit gesetzt werden kann.

251. **Elektrische Uhren** sind Zeigerwerke, welche mittels eines elektrischen Stromes von einer Richtuhr (Normaluhr) aus mit dieser übereinstimmend in Gang gesetzt werden. Das Zeigerwerk besteht aus einem Rad mit 60 Zähnen, in welche ein am Anker eines Elektromagnets befestigter stählerner Stöfser eingreift und das Rad jedesmal um einen Zahn fortschiebt, sobald der Anker von dem Elektromagnet angezogen wird. Dieser Elektromagnet ist in eine Stromleitung eingeschaltet, welche durch eine in der Normaluhr angebrachte Schlufsvorrichtung nach Ablauf einer jeden Minute geschlossen wird. Der auf die Achse jenes Rades aufgesetzte Minutenzeiger springt daher nach jeder Minute um $^1/_{60}$ des Umfangs des Zifferblattes weiter. Solche elektrische Uhren können in beliebiger Anzahl und in beliebigen Entfernungen in dieselbe Leitung eingeschaltet und durch eine einzige Normaluhr mit dieser und unter sich übereinstimmend betrieben werden.

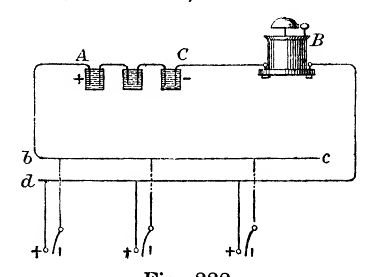


Fig. 222.
Elektrisches Läutewerk.

252. **Elektromagnetische Motoren.** Die kräftigen Wirkungen der Elektromagnete legten den Gedanken nahe, den Elektromagnetismus als bewegende Kraft zum Betriebe von Arbeitsmaschinen anzuwenden. Die Fig. 223 zeigt einen kleinen von Ritchie (1833) angegebenen elektromagnetischen Motor. Auf einem Brettchen ist ein hufeisenförmiger Stahlmagnet mit aufwärts gerichteten Polen *N* und *S* befestigt; in der Mitte zwischen seinen Schenkeln ist eine lotrechte Achse angebracht, welche einen wagrechten Elektromagnet *AB* trägt, dessen Endflächen bei der Drehung über die Pole des Stahlmagnets hinweggehen. Leitet man den Strom nun derart durch die Drahtwindungen des Elektromagnets, dafs sein Ende *A* zu einem Südpol, *B* zu einem Nordpol wird, so wird *A* von *N*, *B* von *S* angezogen und es tritt Drehung in der Richtung des Pfeiles ein. Diese Drehung würde aber ihr Ende erreichen, sobald *A* über *N* und *B* über *S* angekommen ist, wenn nicht dafür gesorgt wäre, dafs in diesem Augenblick die

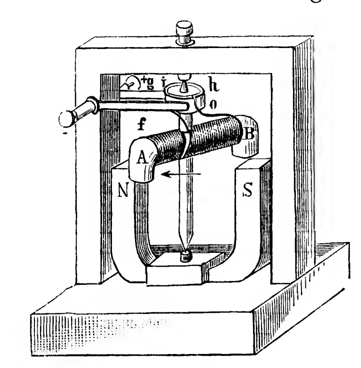


Fig. 223.
Elektromagnetisches Maschinchen von Ritchie.

Stromrichtung in den Drahtwindungen umgekehrt und sonach *A* zu einem Nordpol und *B* zu einem Südpol gemacht wird; da alsdann *A* von *N*, *B* von *S* abgestofsen wird, so setzt sich die Drehung in dem einmal begonnenen Sinne fort. Die Umkehrung des Stromes im geeigneten Augenblick wird aber durch den Stromwechsler oder Kommutator *hi* selbstthätig bewirkt. Derselbe besteht aus einem auf der Drehungsachse isolirt sitzenden Metallring, welcher an zwei gegenüberliegenden Stellen durch isolirende Zwischenräume in zwei getrennte Hälften zerlegt ist, deren eine *h* mit dem einen Ende *o*, die andere *i* mit dem anderen Ende der Drahtwindungen verbunden ist. Auf dem Umfang des Metallrings schleifen zwei Messingfedern *g* und *f*, deren äufsere Enden Klemmschrauben (+ und —) zur Aufnahme der Poldrähte der Batterie tragen. In der in der Figur dargestellten Lage geht der Strom durch die Feder *g* zum Halbring *h* und durch das Drahtende *o* in die Windungen, tritt aus diesen auf den Halbring *i* über, um durch die Feder *f* nach dem negativen Pol der Batterie zu gelangen. In dem Augenblick aber, in welchem *A* über *N* und *B* über *S* weggeht, gehen die isolirenden Zwischenräume zwischen *h* und *i* unter den Federn weg, die positive Feder *g* kommt auf *i*, die negative *f* auf *h* zu liegen, der Strom durchfliefst die Drahtwindungen in umgekehrter Richtung, und die Pole des Elektromagneten kehren sich um. Der Stahlmagnet *NS* kann durch einen feststehenden Elektromagnet ersetzt werden, dessen Windungen von dem nämlichen Strom wie diejenigen des beweglichen durchflossen werden. Die technisch verwendbaren elektromagnetischen Motoren (Elektromotoren) können erst später zur Sprache kommen.

253. **Elektrische Bogenlampen.** Soll das elektrische Bogenlicht (236) zu Beleuchtungszwecken verwendbar sein, so mufs dafür gesorgt werden, dafs die Kohlenstäbe nach Mafsgabe ihres Abbrennens selbstthätig nachgeschoben werden, so dafs der Flammenbogen stets dieselbe Länge und daher auch den nämlichen Widerstand behält. Dieser Zweck wird durch die Kohlenlicht-Regulatoren oder elektrischen Bogenlampen erreicht. Man läfst den Strom, welcher den Flammenbogen erzeugt, zugleich um einen Elektromagnet gehen, welcher, solange die Kohlenspitzen die richtige Entfernung und der Strom die richtige Stärke hat, durch Anziehen eines Ankers ein Uhrwerk hemmt, welches die Kohlen gegeneinander zu schieben bestrebt ist; sobald jedoch infolge Abnutzung der Kohlen die Länge des Lichtbogens zu- und die Stromstärke abnimmt, wird der Anker von dem geschwächten Elektromagnet losgelassen, das Uhrwerk wird frei, die Kohlenspitzen nähern sich einander, bis der Strom wieder stark genug ist, worauf der ebenfalls wieder erstarkte Elektromagnet von neuem die Hemmung bewirkt.

Die nach diesen Grundsätzen konstruirten älteren elektrischen Lampen (von Foucault-Dubosq, Serrin, Hefner-Alteneck u. a.) beanspruchen jede für sich ihren eigenen Stromkreis; werden mehrere solcher Lampen

in denselben Stromkreis gelegt, so versagen sie den Dienst, weil jetzt das Spiel einer jeden nicht mehr von dem Widerstande ihres eigenen Lichtbogens, sondern von der Summe der Widerstände sämtlicher Lichtbogen bedingt wird. Daher sind diese Lampen nur zu Demonstrationszwecken, zu Projektionen u. dergl. in Gebrauch gekommen. Für praktische Beleuchtungsanlagen ist es dagegen erforderlich, mehrere Lampen ohne gegenseitige Störung hintereinander schalten zu können; denn die bei grofsen elektrischen Anlagen üblichen Spannungen sind viel gröfser (2—5mal) als diejenige Spannung, die eine einzelne Bogenlampe für sich beansprucht. Für solche Zwecke werden die Bogenlampen mit Regulatoren versehen, die auch auf elektromagnetischer Wirkung aber ohne Anwendung eines Uhrwerkes beruhen. Die gebräuchlichste Anordnung ist diejenige der Differentiallampen von Hefner-Alteneck, welche in Fig. 224 schematisch dargestellt ist. An dem einen Arm *a* eines um *c* drehbaren Hebels ist die obere Kohle $K_1$, an dem anderen Arm *b* ein lotrechter Eisenstab *S* befestigt, dessen nnteres Ende in eine mit dickem Draht bewickelte Spule (Solenoid) $R_1$, dessen oberes Ende dagegen in eine Spule aus dünnem Draht $R_2$ hineinragt; letzteres Solenoid ist bei *d* und *e* als Nebenschliefsung von grofsem Widerstand dem Hauptschliefsungskreis $L_1 d R_1 c a K_1 K_2 e L_2$ angefügt.

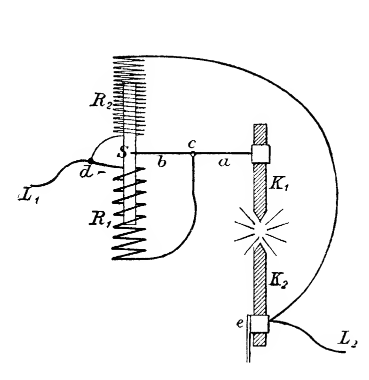



Fig. 224.
Elektrische Differentiallampe.

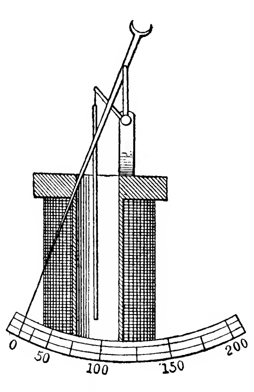



Fig. 225.
Ampèremeter.

Fände nun z. B. der eintretende Strom die Kohlenstäbe $K_1$ und $K_2$ weit getrennt, so geht er ganz durch die dünndrähtige Spule, da der Weg über die dickdrähtige Spule an der Trennungsstelle der Kohlenstäbe unterbrochen ist. Das Solenoid $R_2$ zieht daher den Stab *S* in sich hinein (240), der Arm *b* des Hebels steigt, der Arm *a* läfst die obere Kohle herabsinken, bis die Kohlenspitzen sich treffen. In diesem Augenblick wird die Nebenschliefsung, in welcher sich die Spule $R_2$ befindet, wegen ihres grofsen Widerstandes fast stromlos, während in der Spule $R_1$, deren Widerstand gering ist, jetzt ein kräftiger Strom fliefst; diese zieht den Eisenstab wieder herab, hebt

dadurch die obere Kohle und der Lichtbogen stellt sich her. Infolge des Widerstandes des Flammenbogens wird der Strom in $R_1$ wieder schwächer und wächst dafür in $R_2$, bis bei einem bestimmten Widerstand, d. h. bei einer bestimmten Länge des Bogens, die von $R_1$ und $R_2$ auf den Stab $S$ ausgeübten Anziehungen sich das Gleichgewicht halten.

254. **Strom- und Spannungsmesser für technische Zwecke.** Zur Messung der starken Ströme, welche in der Elektrotechnik, z. B. zur elektrischen Beleuchtung, angewendet werden, benutzt man ebenfalls die Anziehung, welche ein Solenoid auf einen beweglichen Eisenkern ausübt. Der sehr gebräuchliche Strommesser oder Ampèremeter, dessen Einrichtung Fig. 225 zeigt, enthält in einem Gehäuse eine mit dickem Draht bewickelte Spule; ein dünner und leichter Eisenkern, der an einem Arme eines Winkelhebels hängt, wird um so tiefer in die Spule hineingezogen, ein je stärkerer Strom sie durchfliefst, und die Drehung des Hebels wird durch einen auf seiner Achse sitzenden, längs einer Skala spielenden Zeiger angegeben.

Bei den Strommessern nach F. Kohlrausch ist der Eisenkern, auf den die Drahtspule wirkt, an einer Spiralfeder aufgehängt, und ein am Eisenkern befestigter Zeiger läfst an einer vertikalen Skala dessen Stellung erkennen.

Bei einer anderen sehr gebräuchlichen Konstruktion liegt die Spule horizontal. An einer horizontalen Drehungsachse, die excentrisch in der Spule sitzt, ist ein gebogenes Eisenblech befestigt. Bei Durchgang des Stromes sucht sich das Eisenblech an den Spulenrand anzulegen, weil in der unmittelbaren Nähe der Drahtwindungen das magnetische Feld am stärksten ist. Die Schwerkraft eines Hebelarmes oder die Kraft einer Spiralfeder wirken der Drehung des Bleches entgegen und bedingen für jede Stromstärke einen Ausschlag von bestimmter Gröfse.

Die Aichung dieser Apparate, d. h. die Einteilung ihrer Skalen in Ampère, wird bewirkt, indem man Ströme von (z. B. durch ein Knallgas-Voltameter) gemessener Stärke durch sie direkt oder im Nebenschlufs hindurchgehen läfst.

In ganz gleicher Weise werden Spannungsmesser oder Voltmeter konstruirt, nur dafs ihre Spule aus vielen Windungen eines dünnen Drahtes besteht und in den Nebenschlufs zu liegen kommt (229).

255. **Wirkung eines Magnetfeldes auf einen Stromleiter.** Wie ein Strom auf einen Magnetpol eine Kraft ausübt (241, 242), so übt auch umgekehrt ein Magnetpol auf einen stromführenden Draht eine Kraft aus. Bringen wir z. B. einen biegsamen Draht zwischen die Pole eines Hufeisenmagnets, oder noch besser eines kräftigen Elektromagnets, so dafs er senkrecht zu der Richtung der magnetischen Kraft durch das Feld hindurchgeht, und schicken wir nun einen Strom durch diesen Draht hindurch, so beobachten wir, dafs der Draht aus dem Raum zwischen den Polen herausgebogen wird. Es wirkt also auf den stromführenden Draht im Magnetfelde eine Kraft, die auf dem Drahte senkrecht steht und ihn senkrecht zu den Kraft-

linien des Feldes in Bewegung zu setzen sucht. Die Richtung dieser Kraft kehrt sich um, wenn der Strom im Drahte umgekehrt wird, ebenso wenn der Elektromagnet im entgegengesetzten Sinne magnetisirt wird. Den Zusammenhang dieser 3 Richtungen kann man sich mittels der Flemingschen sog. „Linken-Hand-Regel“ merken:

Halten wir den Zeigefinger der linken Hand in die Richtung der Kraftlinien des Magnetfeldes, den Mittelfinger in die des Stromes, so wird der Stromträger in der Richtung des Daumens derselben Hand quer zur Kraftlinienrichtung vorwärts bewegt (Fig. 226). Die Gröfse der Kraft ist der Stärke des magnetischen Feldes, der Stärke

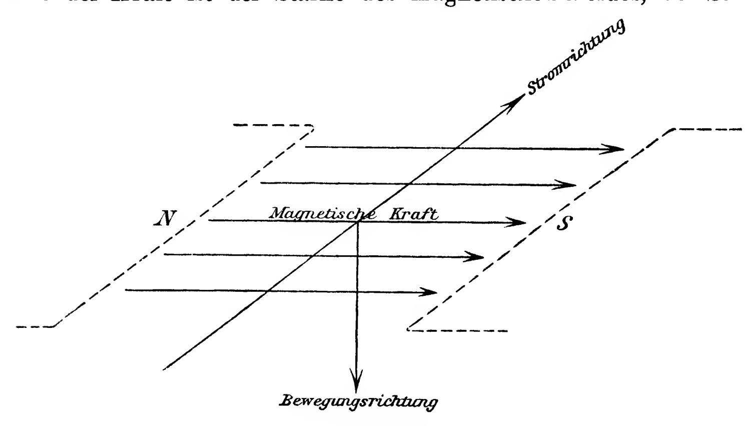



Fig. 226.
Bewegung eines Stromes in einem Magnetfeld.

des Stromes und der Länge des Stromleiters im Felde proportional. Bildet der Draht nicht einen rechten, sondern einen spitzen Winkel mit den Kraftlinien des Feldes, so ist die Kraft kleiner (im Verhältnis des Sinus des Winkels) und wird gleich Null, wenn der Draht in die Richtung der Kraftlinien fällt.

Am einfachsten wird diese Wirkung eines Magnetfeldes auf einen Stromleiter durch das Barlowsche Rad veranschaulicht. (Fig. 227). Eine um ihre horizontale Achse drehbare Kupferscheibe, die mit ihrem gewöhnlich sternförmig gezackten Rande in eine Quecksilberrinne taucht, dreht sich unter dem Einflufs eines der Rinne genäherten Magnetpols, wenn ein Strom von der Achse nach der Rinne, oder umgekehrt, fliefst, in dem einen oder im entgegengesetzten Sinne.

Ebenso wird, wie ein Pol um einen Stromleiter (Fig. 213), auch ein beweglicher Stromleiter, z. B. der auf einer Spitze in einem stählernen Quecksilbernäpfchen drehbare und mit seinen Schenkeln in die kreisförmige Quecksilberrinne tauchende Metallbügel (Fig. 228) um einen feststehenden Magnet rotiren, wenn das Näpfchen durch den Magnet hindurch mit dem einen, die Rinne mit dem anderen Pol einer Stromquelle verbunden ist.

Ein neben einem vertikalen Magnetstab schlaff herabhängendes

biegsames Metallseil oder Metallband beginnt, wenn man einen Strom durch dasselbe sendet, zu rotiren und wickelt sich spiralig um den Magnet; wird der Strom umgekehrt, so wickelt es sich ab und in entgegengesetzter Richtung wieder auf.

Ist der Stromleiter, auf den das Magnetfeld wirkt, nicht geradlinig, sondern umschliefst er eine Fläche, etwa ein Viereck, das mit zweien seiner Seiten den Kraftlinien parallel, mit den beiden anderen aber senkrecht zu ihnen verläuft, so wirkt das Magnetfeld nur auf die beiden letzteren und zwar ist die Kraft, die an der einen Seite angreift, der an der anderen Seite wirkenden entgegengesetzt. Die Kräfte setzen sich daher zusammen zu einem Kräftepaar, das die Stromfläche so zu drehen sucht, dafs der Strom die Fläche in dem-

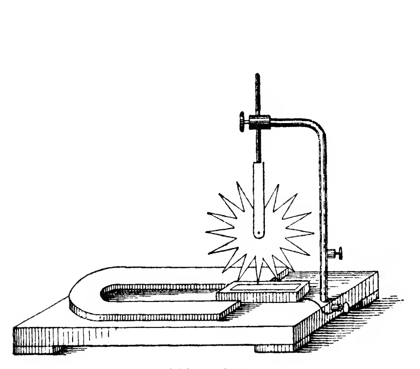


Fig. 227.
Barlowsches Rad.

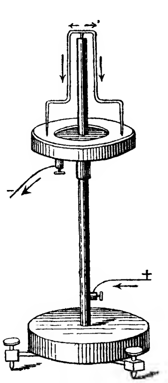


Fig. 228.
Drehung eines Stromes um einen Magnet.

selben Sinne umkreist, in dem die das wirkende Magnetfeld erzeugenden Ströme verlaufen würden (vgl. Fig. 203).

Wie man bei den gewöhnlichen Galvanometern (216) die Stromstärke mifst durch die ablenkende Wirkung einer Spule auf einen Magneten, so benutzt man neuerdings auch die ablenkende Wirkung eines Magneten auf eine Spule zur Strommessung. Beim Deprez-Galvanometer schwebt eine drehbar aufgehängte Drahtrolle, durch welche man den zu messenden Strom leitet, zwischen den Polen eines Hufeisenmagneten. Diese Instrumente haben den Vorteil, dafs Änderungen des Erdmagnetismus, bewegte Eisenmassen, Ströme in der Erde oder in benachbarten Leitungen keinen merklichen Einflufs auf das starke Magnetfeld und damit auf die Ablenkungen der Spule ausüben.

256. **Elektrodynamische Wirkungen.** Da ein Magnetfeld auf einen Stromleiter eine bewegende Wirkung ausübt, und da ferner jeder Strom um sich herum ein Magnetfeld erzeugt, so üben auch Ströme aufeinander bewegende Kräfte aus. Dies hat Ampère 1823 durch Versuche nachgewiesen. Nähert man dem im Ampèreschen

Gestell (Fig. 207) beweglich aufgehängten rechteckig gebogenen Stromleiter (aus Kupfer- oder Aluminiumdraht) *cde* (Fig. 229) den auf dem Brettchen *B* befestigten ebenfalls rechteckig gebogenen Kupferdraht *ab*, durch welchen mittels der Zuleitungsdrähte *f* und *g* ein Strom gesendet wird, so wird der Stromteil *de* von dem ihm parallelen Stromteil *ba* angezogen, wenn in beiden die Ströme gleiche Richtung haben, und der bewegliche Stromleiter stellt sich dem festen gegenüber in eine stabile Gleichgewichtslage, in welche er, wenn er aus ihr herausgedreht wird, nach einer Reihe von Schwingungen wieder zurückkehrt. Gibt man aber dem Strom in *ab* mittels eines in den Schliefsungskreis *fg* eingeschalteten Stromwenders die entgegengesetzte Richtung wie in *de*, so stofsen diese Stromteile sich gegenseitig ab, und der bewegliche Leiter dreht sich um 180° aus seiner anfäng-

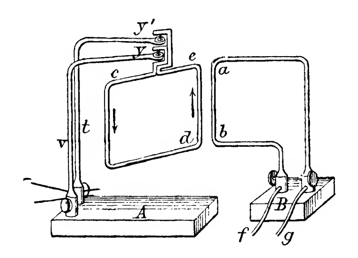



Fig. 229.
Ampèresches Gestell.

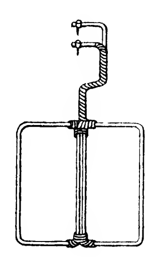


Fig. 230.
Astatischer Leiter.

lichen labilen Gleichgewichtslage in die stabile, indem seine gegenüberliegende Seite, in welcher der Strom die gleiche Richtung wie im Stromteile *ba* hat, diesem gegenüber sich einstellt.

Bei Anstellung dieser Versuche kann der Erdmagnetismus störend wirken, da ja ein beweglicher Stromkreis wie *ced* mit seiner Achse in den magnetischen Meridian, mit seiner Ebene senkrecht zu demselben sich einstellt (240, 255) und durch den Erdmagnetismus in dieser Lage festgehalten wird. Biegt man aber den Draht des beweglichen Leiters so, wie aus Fig. 230 ersichtlich ist, so ist der Leiter dem Einflufs des Erdmagnetismus entzogen, er ist „astatisch"; denn er mufs sich jetzt verhalten, wie zwei fest miteinander verbundene gleichstarke Magnete, deren Pole entgegengesetzt liegen (wie ein astatisches Nadelpaar).

Wenn der Stromleiter *rs* (Fig. 231) über oder unter einem um *a* drehbaren Stromleiter *pq* weggeht, z. B. unter dem wagrechten Teil *d* des am Ampèreschen Gestell aufgehängten Rechtecks (Fig. 229), so dafs die Leiter sich kreuzen, so sind die Ströme bestrebt, sich parallel und gleichgerichtet zu stellen; man kann auch sagen, es finde Anziehung statt zwischen denjenigen Teilen der beiden Leiter, in welchen sich beide Ströme nach dem Kreuzungspunkte *o* hin- oder von ihm fortbewegen, Abstofsung aber zwischen je zwei Teilen

der beiden Leiter, in deren einem der Strom nach der Kreuzungsstelle hin, in dem anderen von ihr wegfliefst.

Aus diesen Versuchen ergibt sich also zusammengefafst, dafs parallele Stromteile bei gleicher Richtung sich anziehen, bei entgegengesetzter Richtung sich abstofsen, und gekreuzte Stromteile das Bestreben zeigen, sich parallel und gleichgerichtet zu stellen. Diese Wirkungen, welche Ampère als elektrodynamische bezeichnete, erklären sich unmittelbar aus der Wirkung, die das Magnetfeld des einen Stromes nach der Linken-Hand-Regel auf den anderen Strom ausübt (255).

Da parallele gleichgerichtete Ströme anziehend aufeinander wirken, so müssen die Windungen einer schlaffen Drahtspirale, welche an einem metallischen Ständer aufgehängt mit einer unten angebrachten Spitze in Quecksilber taucht, sich gegenseitig anziehen, sobald ein

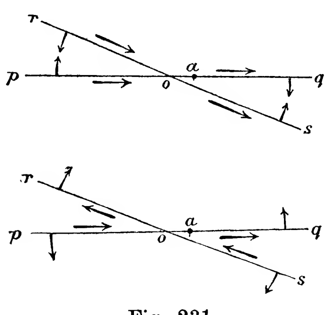



Fig. 231.
Gekreuzte Ströme.

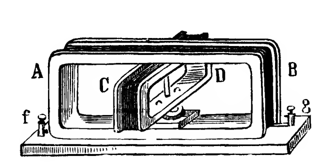



Fig. 232.
Elektrodynamischer Rotationsapparat.

Strom durch die Spirale zum Quecksilber geht. Hierdurch verkürzt sich die Spirale, hebt die Spitze aus dem Quecksilber und unterbricht den Strom; die Anziehung hört jetzt auf, die Spirale verlängert sich durch ihr eigenes Gewicht und stellt den Strom wieder her. Indem sich so der Spiraldraht abwechselnd zusammenzieht und wieder ausstreckt, gerät er in eine auf- und abhüpfende Schwingungsbewegung (Roget, Petrina).

Da es für die Wirkung eines Magnetfeldes ganz gleichgültig ist, ob es von einem Magnete oder einem Solenoide herrührt, so können in all den beschriebenen Apparaten die Magnete durch Solenoide ersetzt werden, z. B. in dem Rotationsapparat Fig. 228. Auch ein dem Ritchieschen entsprechendes Maschinchen kann man aus zwei Drahtspulen, aus einer festen und einer in ihr drehbaren und mit Kommutator versehenen Spule herstellen, (Garthe. Fig. 232).

257. **Das Elektrodynamometer** (W. Weber, 1846) ist ein Galvanometer, dessen Magnet durch ein Solenoid ersetzt ist, dass an den zwei dünnen Zuleitungsdrähten innerhalb eines feststehenden Multiplikators bifilar (32) aufgehängt ist. Die Kraft, mit welcher die bewegliche Rolle abgelenkt wird, ist dem Produkte der Stromstärken in den beiden Rollen, oder, wenn derselbe Strom durch beide Rollen fliefst, dem Quadrat der Stromstärke proportional.

Das Elektrodynamometer von Siemens & Halske (1880), zur Messung der starken in der Elektrotechnik gebrauchten Ströme bestimmt, besteht aus einer inneren festen und einer äufseren beweglichen Rolle; die letztere hat aber nur eine einzige Windung, und ist deshalb von der Einwirkung des Erdmagnetismus fast unabhängig. Die Stromzuführung zu dem beweglichen Draht geschieht durch zwei in der Drehungsachse übereinander liegende Quecksilbernäpfchen; derselbe ist an einer spiralig gewundenen Feder (Torsionsfeder) aufgehängt, durch deren Drehung mittels des oben auf dem Instrument angebrachten Torsionskopfes der abgelenkte Draht wieder in die Ruhelage zurückgeführt wird. Der Torsionskopf trägt einen Zeiger, der auf einem Teilkreis den Drehungswinkel angibt, welcher ein Mafs ist für die ablenkende Kraft. Auf demselben Princip beruhen die Wattmeter, die dazu dienen, den elektrischen Effekt bei Entnahme eines Stromes $J$ aus einer Stromquelle von der Spannung $E$ direkt zu messen. Bei ihnen wird der Strom $J$ durch die eine Spule des Elektrodynamometers (eine Spule von geringem Widerstande) geleitet. Die andere Spule dagegen (von hohem Widerstand) wird, wie im Voltmeter, im Nebenschlufs zum Hauptstrom an die Spannung angelegt. Dann ist der in der zweiten Spule fliefsende Strom der Spannung $E$, und daher der Ausschlag dem Produkt $E \times J$ oder dem elektrischen Effekte direkt proportional.

258. **Ampères Theorie des Magnetismus.** Da sich die Erscheinungen des Magnetismus ohne Anwendung von Stahl oder Eisen durch die elektrodynamische Wechselwirkung galvanischer Ströme nachahmen lassen, so versuchte Ampère, den Magnetismus des Eisens und Stahles auf das Dasein elektrischer Ströme in diesen Stoffen zurückzuführen. Er nahm an, dafs jedes Eisenmolekül von einem kleinen Kreisstrom umflossen werde, der ohne elektromotorische Kraft dauernd fliefst, weil er auf seinem Wege um das Molekül keinen Widerstand zu überwinden hat. In einem unmagnetischen Eisenstab haben die Ebenen dieser molekularen Kreisströme die verschiedensten Lagen und heben deswegen ihre Wirkungen nach aufsen gegenseitig auf. Führt man nun einen elektrischen Strom um den Eisenstab, so richtet derselbe die Molekularströme gleichlaufend mit sich und folglich ihre Achsen parallel zur Achse des Eisenstabes; die Strömchen, welche die inneren Moleküle des Stabes umkreisen, können nach aufsen keine Wirkung ausüben, weil in Bezug auf jedes von diesen Kreisströmchen die benachbarten Strömchen so laufen, dafs sie die Wirkung desselben aufheben; dagegen werden diejenigen Strömchen, welche die am Umfang des Stabes gelegenen Moleküle umkreisen, in dem nach auswärts gewendeten Teile ihrer Bahn durch Nachbarströme nicht aufgehoben; diese Teile sind daher in ihrer Gesamtwirkung der Wirkung von geschlossenen, den ganzen Stab umkreisenden Strömen gleichwertig. Der Stab mufs sich daher verhalten, wie ein von einem Strom durchlaufener Schraubendraht (wie ein Solenoid), er zeigt jetzt die einem solchen eigentümlichen Anziehungs- und Abstofsungserscheinungen, welche man magnetisch nennt, oder er ist zu einem „Elektromagnet“ geworden, dessen Südpol nach der Seite gewendet ist, von welcher aus gesehen sowohl der magnetisirende Strom als auch die Molekularströme des Eisens in der Richtung des Uhrzeigers kreisen. Während die Molekularströme des weichen Eisens, um die Schwerpunkte ihrer Moleküle leicht drehbar, nach Aufhören

der magnetisirenden Ursache in ihre früheren ungeordneten Lagen zurückkehren, behaupten die schwieriger drehbaren des Stahls (Koërcitivkraft) dauernd die ihnen gegebene Anordnung. Ein Stahlmagnet verhält sich sonach wie eine von elektrischen Strömen unaufhörlich umkreiste Drahtspirale. Das Gesetz der Abstofsung gleichnamiger, der Anziehung ungleichnamiger Pole erklärt sich jetzt, wie ein Blick auf die Fig. 233 lehrt, aus dem Bestreben der Ströme in den beiden aufeinander wirkenden Magneten, sich parallel und gleich zu richten. Eine Magnetnadel wird durch den elektrischen Strom abgelenkt, weil die sie umkreisenden Ampèreschen Ströme sich mit

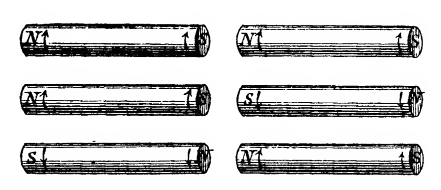



Fig. 233.
Erklärung des Magnetismus nach Ampère.

jenem Strome parallel und gleichgerichtet zu stellen suchen. Auch der Erdmagnetismus ist nach dieser Anschauung nichts anderes als die Wirkung von elektrischen Strömen, welche die Erde unaufhörlich von Osten nach Westen umkreisen.

259. **Induktion.** Im Jahre 1831 entdeckte Faraday, dafs in einem in sich geschlossenen ursprünglich stromlosen Leiter, wenn in seiner Nähe ein vom elektrischen Strom durchflossener Leiter oder ein Magnet bewegt wird, elektrische Ströme entstehen, welche nur so lange dauern, als der Stromleiter oder der Magnet in Bewegung ist. Er nannte diesen Vorgang „Induktion“, und zwar im ersteren Falle „Voltainduktion“, im letzteren Falle „Magnetinduktion“, und die so erregten Ströme „induzirte“ oder „Induktionsströme“.

Ein auf die Spule $A$ (Fig. 234) gewickelter, mit Seide umsponnener Draht, dessen Enden in den Klemmschrauben $a$ und $b$ münden, ist mit den Windungen eines Galvanometers $G$ verbunden und dadurch in sich geschlossen. In den Hohlraum der Spule $A$ kann eine zweite Spule $B$ eingeschoben werden, deren Drahtenden mittels der Klemmschrauben $c$ und $d$ mit den Polen $n$ und $p$ eines galvanischen Elements $E$ in Verbindung stehen, so dafs ein Strom die Drahtwindungen $B$ durchläuft. Schiebt man nun diese vom Strom umflossene Spule $B$ rasch in die Höhlung der Spule $A$, so erkennt man an der Ablenkung der Magnetnadel des Galvanometers, dafs in dem Drahte $A$ ein Strom entstanden ist, welcher die entgegengesetzte Richtung hat wie der in $B$ vorhandene; dieser Strom, welcher durch Annäherung der Drahtwindungen $B$ an die Drahtwindungen $A$ in letzteren erregt oder „induzirt“ wurde, dauert aber nur während der kurzen Zeit der Annäherung; er hört sogleich

wieder auf, sobald die Rolle $B$ in Ruhe gekommen ist und nun ruhig innerhalb $A$ verweilt, denn die Nadel des Galvanometers kehrt sofort, nachdem das Einschieben vollendet ist, wieder in ihre Gleichgewichtslage zurück. Zieht man aber jetzt die Rolle $B$ rasch wieder heraus, oder entfernt man ihre Windungen von denjenigen der Rolle $A$, so zeigt die Magnetnadel, indem sie nach der entgegengesetzten Seite wie vorhin ausweicht und sogleich wieder in die Ruhelage zurückkehrt, an, daſs in der Drahtrolle $A$ ein kurzdauernder elektrischer Strom erregt wurde, welcher mit dem erregenden Strom gleichgerichtet ist.

Statt die „primäre“ oder „Hauptspirale“ $B$ der „sekundären“ oder „Nebenspirale“ $A$ zu nähern oder von ihr zu entfernen, oder statt sie in letztere hineinzuschieben und wieder herauszuziehen, kann man auch bequemer die Hauptspirale ein für allemal in der Neben-

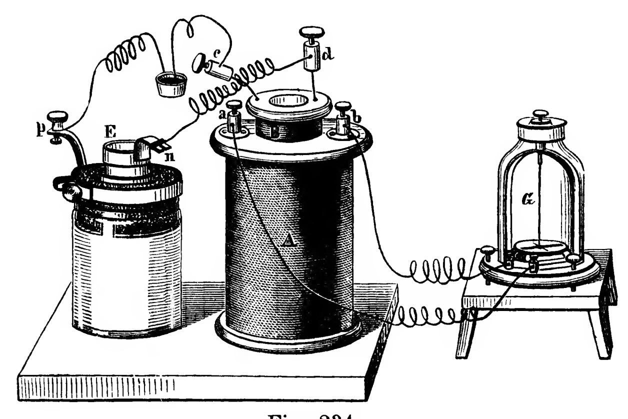



Fig. 234.
Voltainduktion.

spirale stecken lassen, und nun den Hauptstrom abwechselnd schlieſsen und unterbrechen (öffnen). Das Schlieſsen des Hauptstromes wirkt ja gerade so, als hätte man ihn aus unendlicher Entfernung mit Blitzesschnelle in die sekundäre Rolle hineingeschoben, und das Öffnen, als hätte man ihn plötzlich wieder in wirkungslose Ferne versetzt. Beim Schlieſsen des Hauptstromes entsteht daher in der Nebenrolle der dem Hauptstrom entgegengesetzte Schlieſsungsstrom, beim Öffnen der ihm gleichgerichtete Öffnungsstrom.

Das Schlieſsen und Öffnen des Hauptstromes kann, wie in Fig. 234, durch ein Quecksilbernäpfchen bewirkt werden, welches mit dem einen Ende ($c$) des Hauptdrahtes verbunden ist, indem man den vom einen Pol $p$ des galvanischen Elements kommenden Draht in dasselbe eintaucht und wieder herauszieht, während der zweite Poldraht mit dem anderen Ende ($d$) der Hauptrolle verbunden bleibt. Um in der Nebenrolle eine rasche Aufeinanderfolge abwechselnd entgegengesetzt

gerichteter Induktionsströme oder einen „Wechselstrom“ hervorzurufen, schaltet man in den Hauptstrom besondere Unterbrechungsvorrichtungen ein, am besten einen selbstthätigen Unterbrecher, wie den Wagnerschen Hammer (249).

Da ein Magnet (*NS*, Fig. 235) sich verhält wie eine vom Strom durchflossene Drahtspule (257), so mufs er in der Drahtspule *A*, welche durch das Galvanometer *G*[1]) geschlossen ist, beim Hineinschieben und Herausziehen ebenfalls Ströme induziren, welche bei der Annäherung entgegengesetzt, bei der Entfernung gleichgerichtet verlaufen, wie die Ströme, von welchen man den Magnet nach Ampères Theorie umkreist denken kann. Statt einen Magnet einzu-

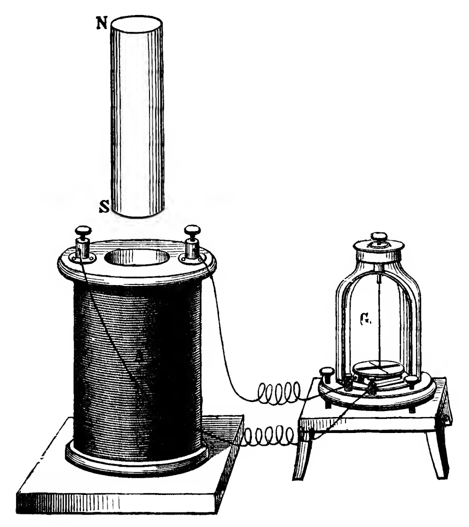



Fig. 235.
Magnetinduktion.

schieben, und herauszuziehen, kann man auch einen weichen Eisenstab ein für allemal in die Höhlung der Spule bringen, und denselben durch Annähern und Entfernen eines Magnetpols abwechselnd magnetisch und wieder unmagnetisch machen. In beiden Fällen werden sonach elektrische Ströme gewonnen durch Magnetinduktion, ohne Anwendung galvanischer Elemente, durch die blofse Bewegung eines Magnets in der Nähe eines geschlossenen Leiters.

Sowohl bei der Volta- als bei der Magnetinduktion erkennt man, dafs die Induktionströme nur entstehen, wenn das durch die Hauptspirale oder durch den Magnet geschaffene Magnetfeld, in welchem die Nebenspirale sich befindet, entsteht oder vergeht, oder überhaupt eine Änderung erfährt. Solange das Solenoid oder der Magnet ruhig

---

[1]) Das Galvanometer mufs in solcher Entfernung aufgestellt sein, dafs der Magnet *NS* auf dessen Nadel nicht direkt einwirken kann.

in der Drahtrolle verweilt, bleibt sein Feld ungeändert und der Draht stromlos. Zieht man ihn aber heraus, so durchschneiden seine Kraftlinien die Drahtringe und wecken in denselben den mit den Ampèreschen Strömen gleichsinnigen Induktionsstrom.

260. **Gesetz von Lenz** (1834). Da gleichgerichtete Ströme sich gegenseitig anziehen, entgegengesetzte sich aber abstofsen, so wird der durchströmte Leiter oder der Magnet bei Annäherung an den induzirten Leiter von diesem abgestofsen, bei der Entfernung aber zu ihm zurückgezogen. Man kann also mit Lenz sagen, dafs durch Bewegung eines stromdurchflossenen Leiters oder eines Magnets gegen einen anderen Leiter in letzterem stets eine Strömung von solcher Richtung hervorgerufen (induzirt) wird, dafs sie vermöge ihrer elektrodynamischen Wirkung die entgegengesetzte Bewegung hervorzubringen und sonach jene Bewegung zu hemmen strebt. Dabei ist Schliefsung oder Verstärkung des Hauptstromes einer Annäherung, Unterbrechung oder Schwächung einer Entfernung gleich zu achten.

Infolge des Lenzschen Gesetzes ist es ersichtlich, dafs alle früher beschriebenen Versuchsanordnungen, die dazu dienen, durch die Wechselwirkung von Strömen und Magneten oder Strömen und Strömen Rotationen hervorzubringen, auch umgekehrt dazu dienen können, Induktionsströme durch Rotation zu erzeugen. Wird z. B. in dem Apparate Fig. 213 das Magnetsystem, oder in dem Apparate Fig. 228 der Bügel in Rotation versetzt, während die Klemmen des Apparates durch einen einfachen Draht, ohne stromerzeugendes Element geschlossen sind, so fliefst durch diesen Draht, so lange die Rotation andauert, ein Strom von der entgegengesetzten Richtung desjenigen Stromes, der jene Rotation hervorrufen würde. Man bezeichnet diese Umkehrungen der elektromagnetischen Rotationswirkung als Unipolar-Induktion, weil gewissermafsen der einzelne Pol dabei induzirend wirkt.

Auch der in Fig. 226 schematisch angedeutete Versuch (255) läfst sich ohne weiteres umkehren. Wird der biegsame Draht senkrecht zu den Kraftlinien des Magnetfeldes nach abwärts bewegt, während er aufserhalb des Feldes zu einem einfachen Stromkreise ohne Element zusammengefügt ist, so entsteht in dem ursprünglich stromlosen Draht während der Bewegung ein Strom, der dem in der Fig. 226 angedeuteten Strom entgegenfliefst. Man kann demnach die Richtung eines Induktionsstromes durch die folgende Rechte-Hand-Regel leicht bestimmen: Hält man den Zeigefinger der rechten Hand in die Richtung der Kraftlinien eines Magnetfeldes, und bewegt man einen Leiter in der Richtung des Daumens derselben Hand quer zur Kraftlinienrichtung, so entsteht in dem Leiter ein Induktionsstrom, dessen Richtung durch diejenige des Mittelfingers gegeben ist.

Auch in dem Gegensatz der Linken- und der Rechten-Hand-Regel kommt das Lenzsche Gesetz zum Ausdruck.

261. **Elektromotorische Kraft des Induktionsstromes.** Bei gleicher induzirender Wirkung hängt die Stärke des erzeugten Induktionsstromes von dem Widerstande des ganzen Schliefsungskreises ab, in dem der Induktionsstrom verläuft. Vergröfsert man bei den in Fig. 234 und 235 abgebildeten Versuchen den Widerstand im induzirten Stromkreise, indem man einen Rheostaten zwischen induzirter Spule und Galvanometer einschaltet, so nehmen die kurz dauernden Ausschläge der Galvanometernadel mit wachsendem Widerstand in derselben Weise ab, wie es die von einem Element hervorgebrachten dauernden Ausschläge thun würden. Die Induktionswirkung besteht also offenbar zunächst darin, dafs in der induzirten Spule eine elektromotorische Kraft erregt wird, die nun ihrerseits den Induktionsstrom nach Mafsgabe des Widerstandes im Stromkreise, also nach dem Ohmschen Gesetze, erzeugt. Das Mafs der Induktionswirkung ist also nicht der Induktionsstrom, sondern die induzirte elektromotorische Kraft. Ihre Gröfse ist proportional der Geschwindigkeit, mit welcher das Magnetfeld, in dem sich der sekundäre Leiter befindet, geändert wird, oder umgekehrt proportional der Zeit, innerhalb welcher diese Änderung erfolgt.

Die Gesetze der Induktionswirkung lassen sich aus dem Prinzip der Erhaltung der Energie herleiten (Helmholtz 1847). Nach dem Lenzschen Gesetz setzt der Induktionsstrom der jeweiligen Bewegung des induzirenden Körpers einen Widerstand entgegen, zu dessen Überwindung eine bestimmte Arbeit aufgewendet werden mufs. Nimmt man an, dafs diese als Energie des erzeugten Induktionsstromes wieder erscheint, dafs also durch den Vorgang der Induktion Arbeit in eine gleich grofse Menge Stromenergie verwandelt wird, so erhält man für die elektromotorische Kraft der Induktion folgenden Ansatz:

Werden zwei Stromkreise aus wirkungsloser (unendlicher) Ferne in ihre gegenwärtige Lage zu einander gebracht, so ist hierzu vermöge ihrer elektrodynamischen Wirkung ein gewisser Arbeitsaufwand nötig. Bezeichnet man mit $M$ diese Arbeit für den Fall, dafs in beiden Leitern die Stromstärke 1 herrscht, so beträgt die Arbeit $JM$, wenn der Strom in dem einen (dem primären) Leiter die Stromstärke $J$, in dem anderen (dem sekundären) die Stärke 1 hat. Man nennt diese Arbeit $JM$ das „elektrodynamische Potential" der beiden Stromkreise aufeinander. Bringt man jetzt die beiden Stromkreise in eine neue Lage zu einander und verändert zugleich in dem primären die Stromstärke, so ändert sich dabei das Potential in $J'M'$, und die hierzu erforderliche Arbeit ist gleich der Differenz der Potentiale $J'M' - JM$, oder, wenn in dem sekundären Leiter nicht die Stromstärke 1, sondern die Stärke $i$ des in ihm erregten Induktionsstromes herrscht:

$$i(J'M' - JM).$$

Bezeichnet man mit $\tau$ die kurze Zeit, während welcher jene Änderung des Potentials vor sich ging, und mit $e$ die elektromotorische Kraft (oder Spannung) des Induktionsstromes, so ist $e\,i\,\tau$ die im sekundären Leiter in der Zeit $\tau$ entwickelte Stromenergie (234). Diese mufs aber der aufgewendeten Arbeit gleichkommen, d. h. es mufs

$$e\,i\,\tau = i(J'M' - JM)$$

sein. Hieraus ergibt sich die elektromotorische Kraft der Induktion

$$e = \frac{J'M' - JM}{\tau};$$

die elektromotorische Kraft der Induktion ist proportional der Änderung des Potentials der beiden Stromkreise aufeinander (der Änderung des Magnetfeldes) und umgekehrt proportional der Zeitdauer dieser Änderung.

Bleibt die Stromstärke des induzirenden Stromes während der gegenseitigen Bewegung unverändert ($J' = J$), so ist die elektromotorische Kraft

$$e = J \cdot \frac{M' - M}{\tau}$$

proportional dieser Stromstärke, und der Geschwindigkeit, mit welcher sich die gegenseitige Lage ändert.

Ändert sich dagegen die Stromstärke im primären Leiter, während derselbe in Bezug auf den sekundären Leiter in Ruhe bleibt ($M' = M$), so ist die elektromotorische Kraft

$$e = M \cdot \frac{J' - J}{\tau}$$

proportional der Geschwindigkeit, mit welcher die Stromstärke sich ändert.

Die Gröfse $M$, welche nur von der Gestalt und Lage der Leiter abhängt, heifst der (gegenseitige) Induktionskoëfficient. Als technische Einheit für diese Gröfse dient das Henry, eine Länge gleich dem Erdquadranten $= 10^9$ cm.

262. **Absolute elektromagnetische Einheit der elektromotorischen Kraft.** Die Beziehung zwischen der induzirenden Wirkung und der induzirten elektromotorischen Kraft läfst sich am einfachsten in dem bei der Aufstellung der Rechten-Hand-Regel behandelten Falle ausdrücken. Befindet sich ein Draht von der Länge $l$ in einem Magnetfelde von der Stärke $T$ und wird er mit der Geschwindigkeit $v$ senkrecht zu den Kraftlinien bewegt, so entsteht in ihm eine elektromotorische Kraft, die um so gröfser ist, je gröfser die Länge und die Geschwindigkeit des Drahtes und je stärker das Feld ist. Darauf gründet sich die von W. Weber vorgeschlagene absolute Einheit der elektromotorischen Kraft. Das ist diejenige, welche in einem geradlinigen Leiter von der Länge 1 ($l = 1$ cm) entsteht, wenn derselbe in einem Magnetfeld von der Stärke 1 ($T = 1$) mit der Geschwindigkeit 1 ($v = 1$ cm/sec) senkrecht zu sich selbst und zu den Kraftlinien bewegt wird. Die uns bereits bekannte praktische Einheit der elektromotorischen Kraft, das Volt, ist das hundertmillionenfache ($10^8$fache) dieser absoluten Einheit.

Denkt man sich die Stärke des Magnetfeldes durch die Zahl der Kraftlinien ausgedrückt, die auf die Flächeneinheit fallen (145), und beachtet man, dafs $lv$ die von dem Draht in einer Sekunde bestrichene Fläche bedeutet, so ist $lvT$ die Anzahl der Kraftlinien, die der Draht bei seiner Bewegung in der Sekunde durchschneidet. Man kann also auch sagen: Die in dem Leiter induzirte elektromotorische Kraft ist gleich der Zahl der von ihm in der Zeiteinheit geschnittenen Kraftlinien. Bildet der Leiter mit den Kraftlinien nicht einen rechten, sondern den Winkel $\varphi$, so vermindert sich die von ihm geschnittene Kraftlinienzahl im Verhältnis von $1 : \sin \varphi$; die elektromotorische Kraft ist demnach Null, wenn der Leiter den Kraftlinien parallel ($\varphi = 0$) ist.

263. **Extraströme. Selbstinduktion.** Ist, wie wir bisher angenommen haben, der Hauptdraht auf eine Spule gewickelt, so wirkt bei jeder Änderung der Stromstärke jede Windung des Hauptdrahtes

auf die benachbarten Windungen desselben induzirend, und erregt beim Schliefsen oder bei jedem Anwachsen des Hauptstromes einen diesem entgegengesetzten, beim Öffnen oder bei jeder Abnahme einen ihm gleichgerichteten Induktionsstrom. Faraday nannte diese im Hauptdraht selbst verlaufenden Induktionsströme „Extraströme“; sie wirken, wie man erkennt, stets den Änderungen des ursprünglichen Stromes entgegen.

Diese sogenannte „Selbstinduktion“ wirkt nicht nur in einem zur Rolle gewickelten, sondern auch in jedem gerade gestreckten Draht; denn man kann sich denselben in Längsfasern zerteilt denken, deren jede auf die benachbarten induzirend wirkt. Die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion ist proportional der Geschwindigkeit, mit welcher sich die Stärke des Hauptstromes ändert.

Die elektromotorische Kraft der Selbstinduktion ist

$$e = L \cdot \frac{J' - J}{\tau},$$

wenn mit $L$ eine nur von der Gestalt des Leiters abhängige Gröfse bezeichnet wird, welche dem gegenseitigen Induktionskoëfficienten $M$ analog ist, und Selbstinduktionskoëfficient genannt wird; er wird wie jener nach Henrys (261) gemessen.

264. **Unterschied zwischen Schliefsungs- und Öffnungsstrom.** Da der beim Schliefsen der Hauptrolle entstehende Extrastrom (der „Gegenstrom“) dem Hauptstrome entgegengesetzt gerichtet ist, so schwächt er ihn und bewirkt, dafs derselbe nach der Schliefsung nicht plötzlich, sondern erst nach einer gewissen kleinen Zeit allmählich anwachsend seine volle Stärke erreicht. Der Öffnungsextrastrom andererseits macht sich durch folgende leicht zu beobachtende Thatsache bemerklich. Bei einem gerade gestreckten Schliefsungsdraht einer galvanischen Batterie erhält man bei Unterbrechung des Stromes nur ein schwaches Öffnungsfünkchen; windet man aber denselben Draht zu einer Spule, so ist die Selbstinduktion beträchtlich wirksamer; zu dem Hauptstrom gesellt sich noch, ihn verstärkend, ein gleichgerichteter kräftiger Extrastrom, der Öffnungsfunke wird viel stärker, und bildet an der Unterbrechungsstelle noch kurze Zeit eine leitende Brücke. Es kann also auch bei der Unterbrechung der Hauptstrom nicht plötzlich verschwinden, sondern er braucht eine kleine Zeit, um von seiner vollen Stärke bis auf Null herabzusinken, welche jedoch von weit kürzerer Dauer ist, als die Zeit, die er braucht, um bei der Schliefsung von Null auf seine volle Stärke anzusteigen, weil in dem grofsen Widerstande des Öffnungsfunkens die Energie des Öffnungsstromes schnell verzehrt wird.

Da nun die in der Nebenrolle induzirten elektromotorischen Kräfte bei gleicher Änderung des Hauptstromes sich umgekehrt verhalten wie die dazu erforderlichen Zeiten, so mufs der beim Öffnen der Hauptspirale in der Nebenspirale entstehende Öffnungsstrom eine gröfsere elektromotorische Kraft oder Spannung und deshalb auch eine

gröfsere augenblickliche Stromstärke besitzen als der Schliefsungsstrom. Dagegen ist die in beiden Strömen sich entladende Elektricitätsmenge (d. i. das Produkt aus Stromstärke und Zeitdauer) die nämliche. Dies erhellt schon daraus, dafs die Wechselströme der Nebenspirale, mittels Platinelektroden durch eine Lösung von Kupfersulfat geleitet, auf keiner der Elektroden einen Kupferniederschlag erzeugen, was doch geschehen müfste, wenn der eine Strom in der einen Richtung eine gröfsere Elektricitätsmenge überführte als der andere in der entgegengesetzten Richtung. Auch ein Galvanometer gibt für jeden einzelnen Öffnungs- oder Schliefsungsstrom gleiche entgegengesetzte Ausschläge; denn da die Dauer beider Induktionsströme weit kürzer ist als die Schwingungsdauer der Magnetnadel, so kommt in beiden Fällen die ganze in jedem Strome sich entladende Elektricitätsmenge stofsweise zur Wirkung (ballistisches Galvanometer). Bei rascher Aufeinanderfolge der Unterbrechungen bleibt die Nadel in Ruhe, weil die entgegengesetzten Antriebe sich aufheben.

Öffnungs- und Schliefsungsstrom unterscheiden sich also dadurch voneinander, dafs die Entladung derselben Elektricitätsmenge bei jenem auf eine äufserst kurze Zeit zusammengedrängt, bei diesem dagegen auf eine vergleichsweise längere Dauer ausgedehnt ist.

265. **Messung des galvanischen Widerstandes in Elektrolyten.** Wie soeben erwähnt wurde, bewirken die rasch aufeinanderfolgenden Wechselströme einer Induktionsrolle beim Durchgang durch eine Flüssigkeit keine chemische Zersetzung und deshalb auch keine Polarisation. Wollte man nach dem früher (230) beschriebenen Brückenverfahren unter Anwendung eines gewöhnlichen galvanischen Stromes (eines „Gleichstromes“) den Widerstand einer Flüssigkeit bestimmen, so würde die Stromstärke nicht nur durch den Widerstand der Flüssigkeit selbst, sondern auch noch durch die Gegenkraft der Polarisation geschwächt, und der gesuchte Widerstand zu grofs gefunden werden. Dieser störende Einflufs der Polarisation wird vermieden, wenn man statt des Gleichstromes die alternirenden Induktionsströme (F. Kohlrausch, 1868) benutzt. Dann mufs aber in die Brücke statt eines Galvanometers, welches ja bei Wechselströmen keinen Ausschlag gibt, ein Elektrodynamometer (257) eingeschaltet werden; da nämlich im Solenoid und im Multiplikator die Ströme sich gleichzeitig umkehren, so erfolgt die Ablenkung stets nach derselben Richtung (s. u. 279).

Bei dieser Anwendung der Wechselströme erhebt sich jedoch eine neue Schwierigkeit. In den Drahtrollen der zur Messung verwendeten Widerstandssätze (225) wirkt nämlich die elektromotorische Kraft des Extrastromes der ursprünglich vorhandenen elektromotorischen Kraft entgegen; die Stromstärke wird dadurch verringert und der Widerstand der Rolle scheinbar vergröfsert. Um diese störende Wirkung der Selbstinduktion zu vermeiden, windet man den Draht so auf, dafs je zwei benachbarte Windungen in entgegengesetzter Richtung laufen, indem man den Draht in der Mitte umbiegt und doppelt aufwickelt. Alsdann heben sich die Extraströme in je zwei benachbarten Windungen gegenseitig auf, und man sagt, die Rolle sei bifilar oder induktionsfrei gewickelt. Auch die magnetische Wirkung der Rolle ist dadurch aufgehoben.

266. **Physiologische Wirkung der Induktionsströme.** Zum Nachweis der Induktionsströme bedarf man des Galvanometers nicht;

wir sind im stande, sie vermöge ihrer starken Wirkung auf unsere Nerven unmittelbar zu empfinden.

Faſst man die beiden Pole einer galvanischen Batterie von nicht zu kleiner elektromotorischer Kraft je mit einer Hand an, um den Strom durch den eigenen Körper zu leiten, so empfindet man eine Zuckung im Augenblick der Schlieſsung des Stromes; der nunmehr mit unveränderter Stärke durch unseren Körper flieſsende Strom bringt im allgemeinen nur eine geringfügige Empfindung hervor; eine erneute Zuckung tritt aber ein, sobald man den einen oder beide Poldrähte losläſst und dadurch den Strom unterbricht. Auf unsere Nerven wirkt also in erster Linie nicht der unveränderte Strom erregend ein, sondern sein Beginnen oder Aufhören, oder überhaupt die Veränderung der Stromstärke ist es, worauf die Bewegungsnerven mit Zuckung antworten, und zwar ist die Wirkung um so beträchtlicher, je jäher diese Veränderung eintritt. Hieraus erklärt es sich, warum der Entladungsschlag einer Leidener Flasche so heftig empfunden wird; die an sich sehr geringe in der Flasche zu hoher Spannung angesammelte Elektricitätsmenge entlädt sich nämlich in äuſserst kurzer Zeit und stellt sonach einen elektrischen Strom dar, welcher mit groſser Schnelligkeit zu seiner vollen Stärke anwächst und ebenso schnell wieder auf Null zurücksinkt. Da die Induktionsströme ebenfalls von kurzer Dauer sind und innerhalb dieser kurzen Zeit rasch anwachsen und rasch wieder abfallen, so bringen sie ungeachtet der geringen durch sie in Bewegung gesetzten Elektricitätsmengen eine sehr starke Erregung der Nerven des tierischen Körpers oder eine beträchtliche „physiologische Wirkung“ hervor, welche noch höher gesteigert wird, wenn die Öffnungs- und Schlieſsungsströme durch das rastlose Spiel des Unterbrechers in rascher Aufeinanderfolge durch den Körper gesendet werden. Dabei bringt der höher gespannte und schneller verlaufende Öffnungsstrom eine weit stärkere Wirkung hervor als der Schlieſsungsstrom. Um die Induktionsströme durch den menschlichen Körper zu leiten, verbindet man gewöhnlich messingene cylindrische Handhaben durch metallische Schnüre mit den Enden der Nebenrolle und nimmt dieselben in die etwas befeuchteten Hände; bei schwachen Strömen empfindet man ein stechendes Prickeln, bei stärkeren Strömen treten krampfartige Muskelzusammenziehungen ein. Ihrer Einwirkung auf die Nerven wegen werden die Induktionsströme zu diagnostischen und Heilzwecken verwendet; man pflegt sie in der Medizin nach Faraday, dem Entdecker der Induktion, als „Faradische Ströme“ und die Behandlung des menschlichen Körpers durch dieselben als „Faradisirung“ zu bezeichnen.

Auch konstante Ströme rufen, wenn ihre Stärke einige Milliampère übersteigt, Empfindungen im Körper und vor allem starken Hautreiz an den Berührungsstellen der Elektroden hervor; es treten starke, länger anhaltende Rötungen der Haut, bei gröſseren Stromstärken Verbrennungserscheinungen auf. Auch die konstanten Ströme werden zu Heilzwecken verwandt. Man bezeichnet die Behandlung

mit ihnen, im Gegensatz zur Faradisirung, als „Galvanisirung“. — Da der Widerstand des menschlichen Körpers, besonders der Haut, im allgemeinen grofs ist, so sind die bei Berührung der Pole einer Batterie von mittlerer Spannung entstehenden Ströme in der Regel nur schwach und ungefährlich. Stärkere Spannungen bedingen Schädigungen bis zur ausgesprochenen Lebensgefahr. Eine untere Grenze der tödlich wirkenden Spannung läfst sich nicht angeben, weil die Stärke der Wirkung von verschiedenen Umständen, vor allem dem sehr verschiedenen Widerstande des Körpers abhängt.

267. **Induktionsapparate. Funkeninduktoren.** Um Induktionsströme von hoher Spannung (elektromotorischer Kraft) zu erzielen, macht man die Haupt- oder primäre Rolle aus einem dicken Draht von wenigen Windungen, damit ihr Widerstand gering und folglich die Stärke des Hauptstromes möglichst grofs sei; der Neben- oder sekundären Rolle dagegen gibt man sehr viele Windungen eines dünnen Drahtes, weil die elektromotorische Kraft mit der Windungszahl zunimmt. Ein für ärztliche Zwecke vorzüglich geeigneter Induktionsapparat ist der Schlittenapparat von Du Bois-Reymond (Fig. 236). Die Nebenspule *N*, deren Drahtenden in den Klemmschrauben *a* und *b* (zur Aufnahme der Drähte mit den Handhaben) münden, ist auf dem Brettchen *S* befestigt, welches wie ein Schlitten in den Nuten des Gestells gleitet; sie kann daher nach Belieben ganz oder nur teilweise über die Hauptspule *H*, welche an dem vertikalen Brettchen *B* wagrecht befestigt ist, geschoben werden, wodurch die Stärke der Induktionsströme nach Bedürfnis abgeändert wird. Die Unterbrechung des Hauptstromes, dessen Poldrähte in die Klemmen *c* und *d* eingeschraubt werden, besorgt der magnetische Hammer *M* (249); die Enden des Hauptdrahtes stehen ferner mit den Klemmschrauben *e* und *f* in Verbindung, in welche die Drähte mit den Handhaben eingeschraubt werden, wenn man den in dem Hauptdraht selbst induzirten Extrastrom benutzen will, der sich bei jeder Unterbrechung des Hauptstromes durch die zwischen *e* und *f* eingeschaltete Nebenschliefsung entlädt.

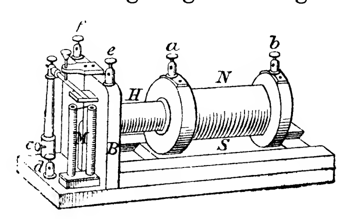


Fig. 236.
Schlittenapparat.

Die induzirende Wirkung der Hauptrolle wird bedeutend verstärkt, wenn man in ihre Höhlung einen Stab von weichem Eisen einschiebt. Der beginnende Hauptstrom macht nämlich den Eisenkern magnetisch, d. h. er zwingt die kleinen Kreisströme, von welchen man sich nach Ampère die Eisenmoleküle umflossen denken kann, die gleiche Richtung anzunehmen wie er selbst; nach seinem Aufhören aber kehren jene Strömchen in ihre früheren ungeordneten Lagen wieder zurück, und der Eisenkern wird wieder unmagnetisch. Diese sich richtenden und ihre Richtung wieder verlassenden Mole-

kularströme erregen nun in der Nebenrolle ebenfalls Induktionsströme, welche mit den gleichzeitig durch den Hauptstrom unmittelbar induzirten gleichgerichtet sind und diese sonach verstärken. Dieser nützliche Einfluſs des Eisenkerns wird aber durch eine andere von ihm ausgehende schädliche Wirkung zum Teil wieder aufgehoben. Wie in jeder zusammenhängenden Metallmasse, welche man etwa in die Hauptrolle einschieben würde, werden auch in dem Eisenstab beim Entstehen und Verschwinden des Hauptstromes Ströme induzirt, welche, von Molekül zu Molekül übergehend, den Umfang des Stabes umflieſsen, das Anwachsen und Abfallen sowohl des Hauptstromes selbst als auch des Magnetismus verzögern und sonach die Dauer der in der Nebenrolle entstehenden Induktionsströme verlängern, wodurch zwar nicht die Menge der in Bewegung gesetzten Elektricität, wohl aber ihre Spannung vermindert wird. Das Zustandekommen jener schädlichen (Foucaultschen) Ströme (vgl. 277) kann man dadurch vermeiden, daſs man statt eines dicken Eisenstabes ein Bündel dünner Eisendrähte, welche durch einen Firnisüberzug voneinander isolirt sind, in die Hauptspule bringt; jene verzögernd wirkenden Ströme rings um den Eisenkern kommen nun nicht zu stande, die Induktionsströme in der Nebenrolle nehmen alsdann den gewünschten raschen Verlauf und wirken viel stärker auf die Nerven als bei Anwendung eines massiven Eisenkerns.

Werden die Enden der Induktionsrolle nicht miteinander leitend verbunden, so stauen sich hier die im Nebendraht beim Entstehen und Vergehen des Hauptstromes in Bewegung gesetzten Elektricitäten, und erzeugen elektrische Spannungserscheinungen, und zwar erscheint jedes Ende, elektroskopisch geprüft, in rascher Aufeinanderfolge abwechselnd positiv und negativ elektrisch, je nachdem es sich augenblicklich mit der vom Öffnungsstrom oder vom Schlieſsungsstrom herangeführten Elektricität geladen hat. Bei hinreichend groſser Spannung springen sogar von jedem Ende der offenen Nebenrolle auf einen genäherten Leiter Funken über; die so entladene Elektricität ist aber immer nur diejenige, welche dem Öffnungsstrom entspricht, denn nur dieser erreicht eine hinreichende Spannung, um eine Luftstrecke in Form eines Funkens durchbrechen zu können. Bei Einschaltung einer Luftstrecke erscheint demnach das eine Ende der Induktionsspule stets positiv, das andere stets negativ, und man bezeichnet sie daher als entgegengesetzt elektrische Pole oder „Elektroden“. Induktionsapparate, welche so starke Spannungserscheinungen zeigen, nennt man Funkeninduktoren; sie wurden zuerst von Ruhmkorff in Paris gebaut. Die heutige Form solcher Apparate zeigt Fig. 237. Um die gewünschte hohe Spannung zu erzielen macht man die Induktionsrolle aus sehr vielen Windungen eines feinen Drahtes, und sorgt auſserdem dafür, daſs der Öffnungsextrastrom, welcher durch Funkenbildung an der Unterbrechungsstelle das Verschwinden des Hauptstromes verzögern würde, möglichst beseitigt wird; dies geschieht dadurch, daſs man zwei zu beiden Seiten

der Unterbrechungsstelle gelegene Punkte des Hauptdrahtes mit den beiden Belegungen eines Kondensators verbindet, der, in dem Fuſsbrette des Apparats enthalten, die beiden Elektricitäten des Extrastromes während der Unterbrechung in sich aufnimmt. Schiebt man durch die Polklemmen $AB$ der sekundären Rolle starke Drähte mit isolirten Handgriffen und nähert die Enden derselben einander, so geht zwischen ihnen ein prasselnder Funkenstrom über, ähnlich demjenigen der Influenzmaschine. Verbindet man die Pole mit den beiden Belegen einer Leidener Flasche, so erhält man, wie bei der Influenzmaschine eine Reihe knallender Funken; ebenso kann eine

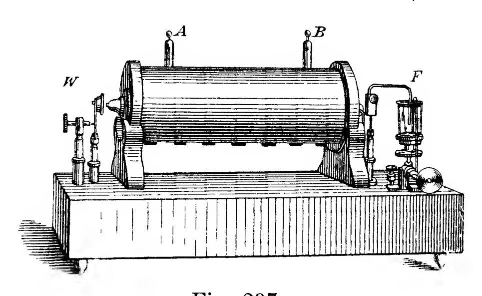



Fig. 237.
Funkeninduktor.

groſse Leidener Batterie in kurzer Zeit geladen werden. Der Funkeninduktor setzt uns also in den Stand, mittels einer galvanischen Batterie, deren Spannung gering ist, alle Erscheinungen der Reibungselektricität, welche ja auf hohen Spannungen beruhen, hervorzubringen.

Zum Betriebe eines Funkeninduktors bedarf man eines selbstthätigen Unterbrechers. Als solchen verwendet man bei kleineren Induktorien den Wagnerschen Hammer (s. Fig. 237 bei $W$). Bei gröſseren Induktorien, die zum Betriebe einer höheren Stromstärke bedürfen, genügt aber die Berührung zwischen Platinspitze und Platinplättchen nicht; hier verwendet man zweckmäſsiger einen starken, in einen Napf voll Quecksilber eintauchenden Platinstift. Zur Unterbrechung des Stromes wird der Stift entweder durch die Wirkung eines Elektromagneten (wie beim Wagnerschen Hammer) aus dem Quecksilber herausgerissen und dann durch eine Feder wieder zurückgeführt (Foucaultscher Quecksilber-Unterbrecher) (s. Fig. 237 bei $F$), oder er wird durch einen kleinen Elektromotor in eine rasche, hin- und hergehende Bewegung versetzt (Motor-Unterbrecher). Man schwächt dabei den Öffnungsfunken und schützt das Quecksilber vor Verdampfung, indem man die Quecksilber-Oberfläche mit einer Schicht Wasser oder Alkohol bedeckt. Einfacher als diese mechanischen Unterbrecher ist der in jüngster Zeit von Wehnelt konstruirte elektrolytische Unterbrecher. Wenn man einen Strom durch eine mit verdünnter Schwefelsäure gefüllte Zersetzungszelle schickt und die eine Elektrode sehr klein wählt, indem man z. B. einer groſsen Bleiplatte eine kurze in ein isolirendes Rohr eingesetzte Platinspitze gegenüberstellt, so tritt an dieser Spitze infolge der hohen Stromdichtigkeit eine Erhitzung des Elektrolyten bis zur Verdampfung ein. Durch die Dampfhülle, die die Spitze umgibt, wird der Strom plötzlich unterbrochen. Befindet sich nun eine Drahtspule, z. B. die primäre Spule eines Induktoriums, im Stromkreise, so entsteht bei dieser plötzlichen Stromunterbrechung ein Öffnungsfunke zwischen Elektrolyt und Platinspitze, der durch seine explosionsartige Wirkung die Dampfhülle zerstört und zu erneutem Stromschluſs Veranlassung gibt. Das Spiel wiederholt sich

dann. Diese Unterbrechungen folgen sehr rasch aufeinander und sind sehr vollständig, so dafs mit diesem Unterbrecher schon kleinere Induktorien sehr kräftige Wirkungen geben. Er funktionirt in der angegebenen Weise aber nur richtig, wenn die Spitze als Anode, die Platte als Kathode benutzt wird. Er verlangt höhere Spannung der treibenden Batterie, als die mechanischen Unterbrecher; man kann uumittelbar die Spannungen elektrischer Centralen benutzen (110 Volt und mehr). Da seine Wirkung auf der Bethätigung des Öffnungsfunkens beruht, so mufs er ohne Kondensator benutzt werden.

268. **Geifslersche (Plückersche) Röhren. Kathodenstrahlen.** Sehr merkwürdig, aber noch wenig aufgeklärt, sind die prachtvollen Lichterscheinungen, welche die Entladungen des Funkeninduktors in verdünnten Gasen hervorrufen. Die verdünnten Gase sind in Glasröhren eingeschlossen, in die an geeigneten Stellen eingeschmolzene Platin- oder Aluminiumdrähte als Elektroden hineinragen, welche aufserhalb mit Ösen zum Einhängen der Leitungsdrähte versehen sind (Gassiot, 1854, Geifsler und Plücker, 1858). Von den mannigfaltigen Formen, welche man diesen Geifslerschen Röhren zu geben pflegt, ist eine der einfachsten in Fig. 238 dargestellt. Enthält die Röhre mäfsig (z. B. auf $^1/_{300}$) verdünnte Luft, und verbindet man die Elektroden mit den Polen eines Funkeninduktors (oder einer Influenzmaschine), so erscheint die negative Elektrode (Kathode) von einer zarten tiefblauen Lichthülle, dem Glimmlicht (vgl. 191), umgeben; von der positiven Elektrode (der Anode) aber ergiefst sich eine pfirsichblütrote Lichtgarbe durch die ganze Röhre fast bis zur negativen Lichthülle, bleibt aber von dieser durch einen dunklen Zwischenraum getrennt; diese Garbe zeigt sich häufig, namentlich wenn Dämpfe von Terpentinöl, Schwefelkohlenstoff oder andere brennbare Gase in der Röhre gegenwärtig sind, in eine Reihe heller und dunkler Schichten zerlegt, welche zur Achse der Röhre senkrecht stehen und in wellenartiger Bewegung vom positiven nach dem negativen Pol fortzuschreiten scheinen. Einem genäherten elektrischen Strom oder einem Magnet gegenüber verhält sich die positive Lichtgarbe wie ein beweglicher Stromleiter; sie wird z. B. von einem Magnet abgelenkt nach denselben Gesetzen wie ein beweglicher Leitungsdraht, und gerät in dauernde Umdrehung um einen Magnetpol. Man zeigt dies bequem mittels der Vorrichtung Fig. 239; in ein eiförmiges Glasgefäfs, in welchem die Luft hinreichend verdünnt ist, ragt ein mit einer Glashülle bedeckter Eisenstab $E$ hinein; der Lichtstrom ergiefst sich parallel zum Eisenstab zwischen den beiden Platinelektroden, deren eine ($a$) am oberen Ende des Eies angebracht ist, während die andere ($b$) weiter unten den Eisenstab ringförmig umgibt; stellt man das Ei auf den Pol eines Elektromagnets $M$, so wird der Eisenstab magnetisch, und die Lichtgarbe dreht sich nun um denselben ebenso, wie ein beweglich aufgehängter Leitungsdraht (255); die Richtung der Drehung kehrt sich um, wenn man mittels des Kommutators $K$ die Pole des Elektromagnets wechselt.

Obgleich eine Geifslersche Röhre ihr sanftes Licht ohne Unterbrechung auszustrahlen scheint, so besteht dasselbe doch nur aus

einer raschen Reihenfolge einzelner sehr kurz dauernder Entladungen, deren Bilder, wenn sie in unserem Auge auf dieselbe Stelle der Netzhaut fallen, zu einem einzigen dauernden Lichteindruck verschmelzen; versetzt man aber die Röhre mittels einer Schwungmaschine in rasche Umdrehung um ihr eines Ende, so fallen die Bilder der einzelnen Entladungen auf verschiedene Stellen der Netzhaut, und man erblickt einen gleichsam aus vielen leuchtenden Röhren gebildeten prachtvollen Stern.

Die Farbe des positiven Lichtstromes ist je nach der Beschaffenheit des in der Röhre enthaltenen Gases verschieden, z. B. in Wasserstoffgas purpurrot, in Kohlensäure grünlich. Immer aber ist sein

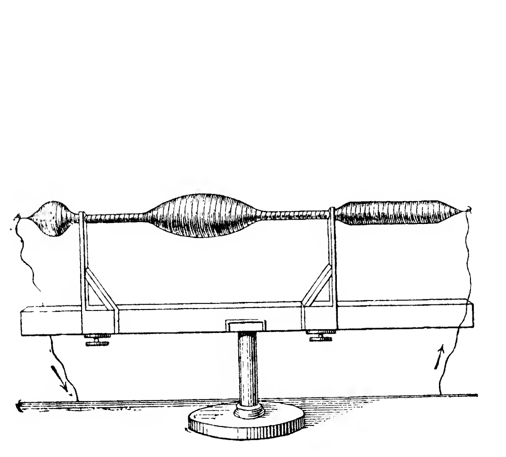


Fig. 238.
Geifslersche Röhre.

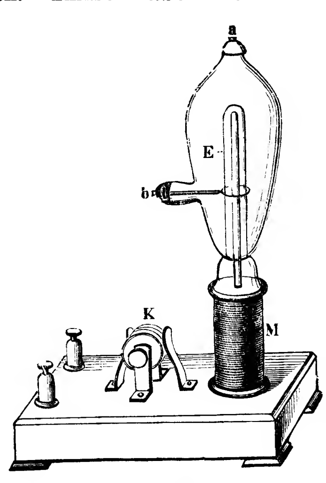



Fig. 239.
Drehung des Lichtstromes um einen Magnet.

Licht reich an jenen violetten und ultravioletten Strahlen, welche das als „Fluorescenz" bezeichnete Selbstleuchten des Glases hervorzurufen im stande sind; indem man Teile der Röhre aus stark fluorescirenden Glassorten, z. B. dem hellgrün leuchtenden Uranglas, in zierlichen Formen herstellt, wird die Pracht und Mannigfaltigkeit der Lichterscheinungen noch bedeutend gesteigert.

Wird die Luft in einer Röhre weiter verdünnt als in den gewöhnlichen Geifslerschen Röhren, so dehnen sich das bläuliche negative Licht und der dunkle Raum, der es vom positiven Lichte trennt, immer weiter aus; das positive Licht aber zieht sich zurück und verschwindet endlich ganz. Während der positive Lichtstrom in einer gewöhnlichen Geifslerschen Röhre wie ein beweglicher Stromleiter die Verbindung nach der negativen Elektrode herstellt, sich stets nach dieser hinwendet und allen etwa vorhandenen Krümmungen der Röhre folgt, geht in Röhren, in denen die Luft bis auf etwa ein Milliontel einer Atmosphäre verdünnt ist, von dem negativen Pole, der Kathode,

eine eigentümliche Wirkung aus, die sich in geraden Linien, senkrecht von der Oberfläche der Kathode ausbreitet, und in ihrem Verlaufe durch die Lage der Anode nicht zum mindestens beeinflufst wird. Man hat dieser Erscheinung nach Goldsteins Vorschlag den Namen Kathodenstrahlen gegeben. Crookes (1879) bediente sich zum Nachweis dieser von Hittorf (1869) entdeckten Eigentümlichkeit des Entladungsvorganges in stark verdünnten Gasen der folgenden Einrichtung. In die **V**-formige Röhre Fig. 240 sind drei Drähte *a b c* eingeschmolzen, deren jeder eine kleine kreisförmige Blechplatte trägt; setzt man *a* mit dem negativen, *b* mit dem positiven Pol des Induktionsapparats in Verbindung, so pflanzt sich das negative Licht in gerader Linie nur bis *c* fort, ohne dort um die Ecke zu biegen, und verbindet

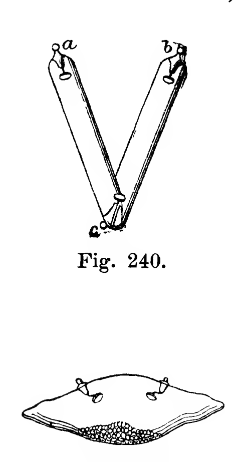



Fig. 240.

Fig. 242.

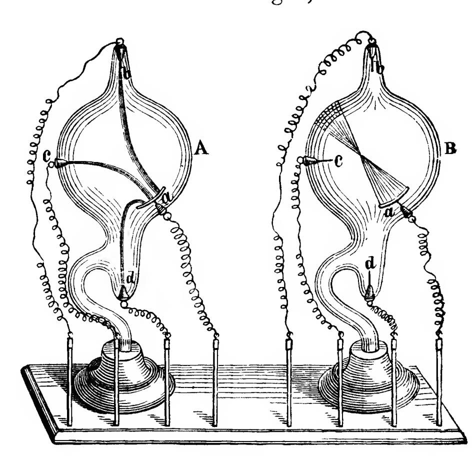



Fig. 241.

Crookessche Röhren.

man *a* mit dem positiven, *c* mit dem negativen Pol, so ergiefst sich das negative Licht in der zur Kathodenplatte *c* senkrechten Richtung geradlinig nach *b* hin, ohne sich um die bei *a* liegende positive Elektrode zu kümmern. Der wesentliche Unterschied zwischen der elektrischen Entladung in mäfsig verdünnter und sehr stark verdünnter Luft läſt sich sehr auffallend an den beiden ganz gleichen, kugelförmigen Gefäfsen *A* und *B* (Fig. 241) wahrnehmen, deren ersteres nur bis zu einem mässigen Grade (2 mm Quecksilber), das andere aber bis auf etwa ein Milliontel Atmosphäre ausgepumpt ist. Verbindet man die Elektrode *a*, welche die Form einer Schale hat, mit dem negativen, die Elektroden *b*, *c*, *d* der Reihe nach mit dem positiven Pol, so sieht man in dem ersten Gefäfs einen roten Lichtstrom von der jeweiligen positiven Elektrode nach der negativen Elektrode sich ergiefsen, und an letzterer die blaue negative Lichthülle auftreten, in dem anderen Gefäfs aber sieht man nichts von einer positiven Lichtgarbe; von der schalenförmigen negativen Elektrode jedoch gehen die

Kathodenstrahlen aus, laufen im Mittelpunkt der Kugel, von welcher die Schale ein Abschnitt ist, wie in einem Brennpunkt zusammen, gehen darüber hinaus wieder kegelförmig auseinander und erzeugen auf der gegenüberliegenden Glaswand einen Fleck grünen Phosphorescenzlichts, der sich heifs anfühlt; diesen Weg schlagen die Kathodenstrahlen unbeirrt ein, welchen der Drähte *b*, *c*, *d* man auch zur Anode machen mag. Die Kathodenstrahlen selbst sind nicht sichtbar. Man kann ihren Weg nnr verfolgen an den Wirkungen,

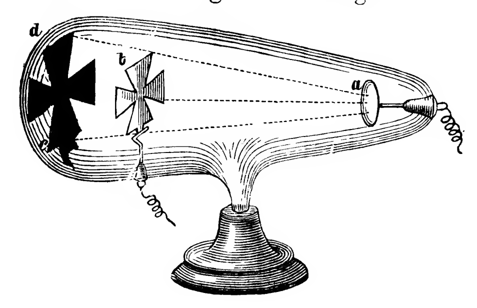



Fig. 243.

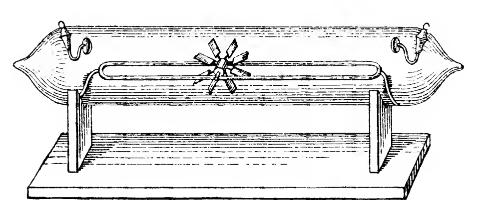


Fig. 244.
Crookessche Röhren.

die sie auf Körper, die sie treffen, ausüben. Diese Wirkungen sind verschiedener Art.

Ein Körper, der von Kathodenstrahlen getroffen wird, erwärmt sich: wird in der Glaskugel Fig. 241 *B* im Krümmungsmittelpunkt der schalenförmigen negativen Elektrode *a* ein Stück Platin-Iridium angebracht, so wird dasselbe durch die gesammelten Strahlen bis zur Weifsglut erhitzt und schliefslich geschmolzen.

Da wo die Strahlen des Kathodenlichts auf die Glaswand des Gefäfses treffen, erregen sie das Glas zu lebhaftem Selbstleuchten (Fluorescenz und Phosphorescenz); das Thüringer Glas, aus welchem diese Gefäfse gewöhnlich verfertigt werden, leuchtet hell apfelgrün, Uranglas dunkler grün, englisches Glas blau. Um die Phosphorescenz anderer Körper unter der Einwirkung der Kathodenstrahlen zu beobachten, schliefst man sie in Röhren wie Fig 242 ein; Rubin und Kalkspat leuchten rot, Diamant hellgrün, Galmei smaragdgrün, Phenakit blau, Pektolith gelb.

Die Strahlen des Kathodenlichts werden von einem festen Körper, auf den sie treffen, aufgehalten; in dem birnförmigen Gefäfs Fig. 243 trägt die positive Elektrode ein aus Aluminiumblech ausgeschnittenes Kreuz *b*; da nur die an dem Kreuz vorbeigehenden Strahlen *ac*, *ad* der Kathode *a* zur gegenüberliegenden Glaswand gelangen und deren Phosphorescenz erregen, so erscheint daselbst auf hellgrün leuchtendem Grunde der dunkle Schatten des Kreuzes. Wirft man jetzt das um ein Scharnier drehbare Kreuz durch eine leichte Erschütterung des Apparats um, so dafs die geradlinigen Kathodenstrahlen nun die gegenüberliegende Glaswand ungehindert treffen, so tritt das vorher dunkle Kreuz jetzt hell auf dunklerem Grunde hervor; das Glas hat nämlich an den schon vorher von den Strahlen getroffenen Stellen sein Phosphorescenzvermögen teilweise verloren; der Teil aber, welcher vorher beschattet war, ist noch nicht „ermüdet“, sondern besitzt noch frische Empfänglichkeit.

Die Kathodenstrahlen üben auf die von ihnen getroffenen Körper einen Stofs aus, und vermögen daher, wie Crookes entdeckt hat, mechanische Wirkungen hervorzubringen. In der Röhre Fig. 244 ist eine gläsere Schienenbahn angebracht, auf welcher ein kleines Rad mit Glimmerschaufeln rollen kann; verbindet man die oberhalb der Bahn gelegenen Elektroden mit den Polen des Induktors, so wird das Rad von der Kathode nach der Anode hingetrieben, als ob von jener her ein Luftstrom gegen die oberen Schaufeln bliese.

Die Kathodenstrahlen schienen in die Röhre gebannt zu sein, so dafs Körper, die man ihrer Wirkung aussetzen wollte, in die Röhre eingeschlossen werden mufsten, bis es Lenard (1893) gelang, sie ins Freie zu lassen. Nachdem Hertz gefunden, dafs dünne Blattmetalle für Kathodenstrahlen durchlässig sind, fügte Lenard in die Wand einer Hittorfschen Röhre ein dünnes Aluminiumblatt ein, und durch dieses dunkle „Fenster“ in durchsichtiger Wand traten die Kathodenstrahlen hinaus in die Luft und erregten sie zu diffusem Leuchten.

Auch die Kathodenstrahlen unterliegen der Einwirkung des Magnets. Sie werden durch ein magnetisches Feld, entsprechend der Linken-Hand-Regel (255), so abgelenkt, als ob positive Elektricität in ihnen auf die Kathode zuströmte. Aber sie verhalten sich dabei (nach Hittorf) wie ein geradliniger steifer Stromfaden, der nur mit seinem einen Ende an der Kathode festsitzt, während der positive Lichtstrom in weniger verdünnten Gasen als ein biegsamer Leiter erscheint, dessen beide Enden fest sind. Da nun die Kathodenstrahlen offenbar eine Erscheinung sind, die nicht auf die Kathode zu, sondern von ihr fortwandert, so hat man es in ihnen mit einem Strom negativer Elektricität zu thun, der von der Kathode ausgeht. Es ist auch gelungen (Perrin, 1895) nachzuweisen, dafs sie negative Ladungen mit sich führen. Treffen sie auf einen isolirten Körper, so laden sie ihn negativ. Von einem positiv geladenen Körper werden sie angezogen, von einem negativ

geladenen, z. B. einer zweiten Kathode, werden sie abgestofsen (Deflexion, Goldstein).

Alle Eigenschaften der Kathodenstrahlen lassen sich durch die Annahme erklären, dafs negativ geladene, kleine Massenkörper von der Kathode fortgeschleudert werden. Crookes, der diese Theorie zuerst aufstellte, glaubte, diese Massenkörper wären die Gasmoleküle. Die neueste Forschung hat aber ergeben, dafs die in den Kathodenstrahlen bewegten Massen viel kleiner sind als die Gasmoleküle. Es ist nämlich möglich, aus der Gröfse der Ablenkung, welche die Kathodenstrahlen in einem elektrischen und in einem magnetischen Felde von bekannter Stärke erfahren, sowohl die Geschwindigkeit dieser Teilchen, als auch das Verhältnis ihrer elektrischen Ladung zu ihrer Masse zu ermitteln. Die Geschwindigkeit, mit der sich diese kleinen Massen in der Richtung der elektrischen Kraftlinien von der Kathode fortbewegen, hängt natürlich von der Gröfse der treibenden Kraft, d. h. dem Potentialgefälle ab, ist aber stets aufserordentlich grofs. Sie hat sich durchschnittlich zu 100 000 km in der Sekunde ergeben. Das Verhältnis der Ladung zur Masse aber hat man 2000 mal gröfser gefunden, als es für ein Wasserstoffion in einem Elektrolyten sein würde. Da man ferner hat nachweisen können, dafs diese Teilchen die gleiche Ladung mit sich führen, wie ein einwertiges elektrolytisches Ion, so folgt daraus, dafs ihre Masse 2000 mal kleiner ist als diejenige eines Wasserstoffatoms. J. J. Thomson, dem wir im wesentlichen diese Feststellungen verdanken, hat diesen Teilchen den Namen Korpuskeln gegeben, von anderen werden sie als Elektronen bezeichnet.

Die Erscheinungen des Kathodenlichts entwickeln sich am vollkommensten bei einem gewissen Grade der Verdünnung, etwa bei einem Druck von ein Milliontel Atmosphäre; darüber hinaus werden sie schwächer, und wenn man die Verdünnung noch weiter treibt durch fortgesetztes Auspumpen mit einer sehr guten Quecksilberluftpumpe und unter Anwendung von Stoffen, welche die noch vorhandenen Gasreste zu absorbiren vermögen, so kann man schliefslich ein Vakuum erhalten, durch das elektrische Entladungen überhaupt nicht mehr hindurchgehen.

269. **Röntgenstrahlen. Becquerelstrahlen.** Die Kathodenstrahlen üben, wenn sie auf Körper auftreffen, noch eine andere sehr merkwürdige Wirkung aus.

Röntgen (1895) fand, dafs eine in die Nähe einer Hittorfschen Röhre gebrachte fluorescirende Substanz, z. B. Bariumplatincyanür, hell aufleuchtet, auch dann, wenn die Röhre mit schwarzem undurchsichtigen Karton umhüllt ist. Er wies nach, dafs von der Röhre, und zwar von den Stellen der Glaswand, die von Kathodenstrahlen getroffen werden, eine unsichtbare Strahlung ausgeht, welche die Kartonhülse durchdringt, und sich geradlinig nach allen Seiten verbreitet. Diese Strahlen, von Röntgen selbst X-Strahlen genannt, werden heute allgemein als Röntgenstrahlen bezeichnet. Man erhält kräftigere Wirkungen, wenn die Kathodenstrahlen nicht auf Glas, sondern auf ein in der Röhre angebrachtes Platinblech fallen. Man verstärkt ferner die Wirkung und erreicht den Vorteil, dafs die Röntgenstrahlen alle nahezu von demselben Punkte ausgehen, indem man eine hohlspiegelartig geformte Kathode verwendet und das Platinblech in dem Brennpunkt der Kathodenstrahlen anbringt (Fokusröhren.) Fig. 245 zeigt die Form einer solchen Röntgenröhre. Es

empfiehlt sich im allgemeinen, das Platinblech *c*, die sogenannte Antikathode, mit der Anode *b* zu verbinden.

Diese Röntgenschen Strahlen unterscheiden sich von den Kathodenstrahlen dadurch, daſs sie von einem Magnet nicht abgelenkt werden; für sie sind alle Körper mehr oder weniger durchlässig; sie gehen leicht durch Papier, Holz, Leder, Hartgummi, auch durch nicht zu dicke Metallplatten. Die Durchlässigkeit ist bei gleicher Schichtendicke wesentlich bedingt durch die Dichte; das spezifisch schwere Blei ist bei 1,5 mm so gut wie undurchlässig, während eine zehnmal so dicke Schicht des leichten Aluminiums die Wirkung zwar schwächt, aber nicht völlig aufhebt. Wie Röntgen ferner zeigte, werden diese Strahlen weder regelmäſsig zurückgeworfen, noch gebrochen.

Man hat diese Strahlen für Licht von sehr kurzer Wellenlänge gehalten; es ist aber nicht möglich, eine Wellenlänge der Röntgenstrahlen festzustellen. Vielmehr sprechen die Versuche dafür, daſs man es bei ihnen nicht mit Wellen von bestimmter Periode, sondern nur mit ganz kurz dauernden Erschütterungen des Lichtäthers zu thun hat, die durch das Aufprallen der Kathodenstrahlteilchen mit ihrer auſserordentlichen Geschwindigkeit auf die Antikathode hervorgebracht werden.

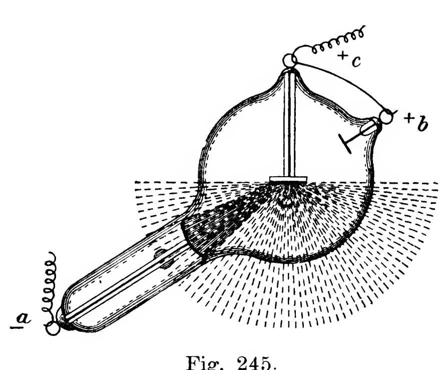


Fig. 245.
Röntgenröhre.

Von besonderer Bedeutung ist, daſs gewöhnliche photographische Trockenplatten für die Röntgenschen Strahlen empfindlich sind, so daſs man die Erscheinungen dauernd fixiren kann. Da die Strahlen durch Holz und Papier fast ungehindert hindurchgehen, so kann man die Aufnahmen bei verschlossener Kassette oder auf der in schwarzes Papier gewickelten Platte selbst im beleuchteten Zimmer machen. Metallene Gegenstände, wie die in einem Holzkasten eingeschlossenen Messingstücke eines Gewichtssatzes oder die Münzen in einem verschlossenen Portemonnaie, bilden sich auf der Platte ab, indem die Strahlen durch Holz und Leder durchgehen und die empfindliche Schicht schwärzen, dagegen an den von Metall bedeckten Stellen mehr oder weniger abgehalten werden. Legt man die Hand auf den Holzdeckel der Kassette oder auf die Papierhülle, so erscheint auf der Platte, da die Strahlen durch die Weichteile leichter hindurchgehen als durch die Knochen, ein Schattenbild des Handskeletts, welches (im Positiv) die dunklen Schatten der Knochen in dem nur wenig dunklen Bilde der Hand zeigt. Ein goldener Ring scheint frei um den Finger zu schweben. Mittels kräftiger Fokusröhren und starker Entladungen eines groſsen Induktoriums gelingt es, nicht bloss von den Extremitäten, sondern

auch vom Kopf und Rumpf Durchleuchtungsbilder auf einem Bariumplatincyanür-Schirm und photographische Aufnahmen zu erhalten. In der Medizin, besonders in der Chirurgie, wird von dieser Methode, das Innere des Körpers zu untersuchen, ausgedehnter Gebrauch gemacht.

Bald nach der Entdeckung Röntgens machte H. Becquerel die weitere sehr merkwürdige Entdeckung, dafs Wirkungen ähnlicher Art, wie sie die Röntgenstrahlen ausüben, andauernd von metallischem Uran und Uransalzen ausgehen. G. C. Schmidt wies das Gleiche von Thorium-Verbindungen nach, und neuerdings ist es Herrn und Frau Curie gelungen, aus der Pechblende auf chemischem Wege Substanzen herzustellen, die die gleiche Eigentümlichkeit in sehr viel stärkerem Mafse zeigen. Es ist nicht unwahrscheinlich, dafs man es hier mit neuen Elementen zu thun hat, von denen das eine dem Barium, das andere dem Wismut verwandt ist. Die Entdecker haben ihnen die Namen Radium und Polonium gegeben. Allgemein bezeichnet man alle Stoffe, welche diese eigentümliche Strahlung, die sog. Becquerelstrahlen, aussenden, als radioaktive Substanzen. Die Wirkungen dieser Strahlen sind denjenigen der Röntgenstrahlen ähnlich, aber aufserordentlich viel schwächer. Sie durchdringen Metalle und andere undurchsichtige Körper, auch in dickeren Schichten. Sie erregen Fluorescenz und Phosphorescenz und wirken auf die photographische Platte. Einen empfindlicheren Nachweis für diese Strahlen hat man in dem Umstande, dafs sie die Luft leitend machen, worin sie ebenfalls mit den Röntgenstrahlen übereinstimmen. Fallen Röntgen- oder Becquerelstrahlen auf einen geladenen Körper, oder kommt ein solcher Körper mit Luft in Berührung, die von Röntgen- oder Becquerelstrahlen durchsetzt worden ist, so verliert er seine Ladung. Man erklärt sich dies durch den Umstand, dafs jene Strahlungen die Luft ionisiren, d. h. in entgegengesetzt geladene Bestandteile zerspalten; der geladene Körper stöfst dann die gleichnamig elektrisirten Ionen ab, zieht die ungleichnamig elektrisirten an und entladet sich dadurch.

Die Becquerelstrahlen sind nicht einheitlicher Art. Es lassen sich Strahlen von sehr verschiedener Durchdringbarkeit unterscheiden. Aufserdem entspricht ein Teil dieser Strahlung nicht den Röntgen- sondern den Kathodenstrahlen; dieser Teil der Becquerelstrahlung ist magnetisch und elektrisch ablenkbar und man kann an ihnen die gleichen Messungen über Geschwindigkeit und Verhältnis von Ladung zur Masse der Elektronen anstellen wie bei den Kathodenstrahlen (W. Kaufmann 1901). Danach hat man es in diesen Fällen mit Substanzen zu thun, die andauernd Elektronen aussenden.

270. **Magnetelektrische Maschine.** Die Induktionserscheinungen gewähren die Möglichkeit, ohne Zuhülfenahme von galvanischen Elementen oder anderen Stromquellen, ausschliefslich durch Bewegung von Spulen in einem Magnetfelde elektrische Ströme zu erzeugen. Wir betrachten zunächst die Induktionswirkung in einem einfachen geschlossenen Leiter, etwa dem Drahtviereck *abcd* (Fig. 246), wenn dasselbe durch ein Magnetfeld, senkrecht zu den Kraftlinien in der Richtung *BA* hindurchbewegt wird. Nach der Rechten-Hand-Regel (260) werden dabei in den Seiten *ab* und *cd* elektromotorische

Kräfte induzirt, die gleich grofs sind und sich daher gegenseitig aufheben, wenn *ab* und *cd* in gleicher Zeit gleich viele Kraftlinien schneiden. Schneidet aber *ab* mehr Kraftlinien als *cd*, treten also durch *ab* mehr Kraftlinien in die Fläche des Vierecks ein, als durch *cd* aus ihm austreten, so überwiegt die elektromotorische Kraft in *ab* und es entsteht ein Strom in der Richtung *adcb*. Treten aber umgekehrt durch *cd* mehr Kraftlinien aus, als durch *ab* eintreten, so überwiegt die elektromotorische Kraft in *cd* und es entsteht ein Strom in der entgegengesetzten Richtung *abcd*. Allgemein kann man sagen: In einer Spule entsteht ein Induktionsstrom, sobald sich die Zahl der magnetischen Kraftlinien, die die Spule durchsetzen, ändert. Die Gröfse der induzirten elektromotorischen Kraft ist durch die Zahl der in der Sekunde in die Spule eintretenden oder aus-

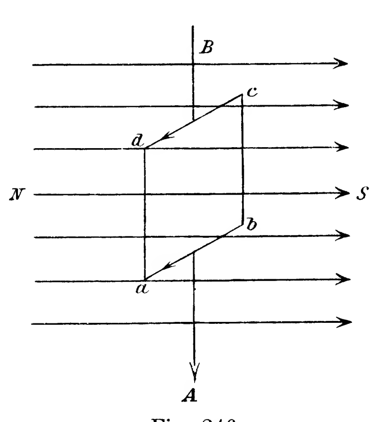



Fig. 246.
Induktion in geschlossenem Leiter bei Bewegung durch ein Magnetfeld.

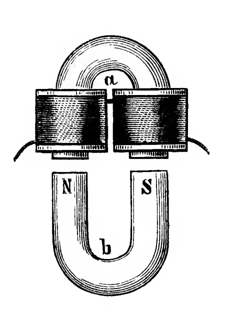



Fig. 247.
Magnetinduktion.

tretenden Kraftlinien bestimmt; die Richtung aber ist entsprechend dem Lenzschen Gesetze stets so, dafs der Induktionsstrom mit seinen magnetischen Kraftlinien der Änderung des Feldes entgegenwirkt. Nimmt die Zahl der Kraftlinien zu, so ist der Induktionsstrom so gerichtet, dafs sein Kraftfeld dem erregenden entgegengesetzt gerichtet ist; nimmt jenes ab, so ist das Kraftfeld des Induktionsstromes ihm gleichgerichtet. Diese Fassung des Induktionsgesetzes macht die Wirkungsweise der zur Stromerzeugung dienenden Maschinen leicht verständlich.

Bei den ältesten Maschinen benutzte man zur Erzeugung des magnetischen Feldes Stahlmagnete; man bezeichnet derartige Maschinen als magnetelektrische Maschinen. Einem kräftigen Hufeisenmagneten (Fig. 247) steht ein ebenfalls hufeisenförmiger Eisenkern gegenüber, dessen Schenkel mit Drahtspulen umgeben sind. Entweder der Magnet (Pixii, 1832) oder der Eisenkern mit den

Spulen (Clarke, 1836) ist drehbar um die Mittellinie *ab*. In der gezeichneten Stellung gehen die Kraftlinien durch die linke Spule von unten nach oben, durch die rechte von oben nach unten. Wird der bewegliche Teil um 90° gedreht, so verschwinden die Kraftlinien und treten bei weiterer Drehung um 90° in umgekehrter Richtung wieder in die Spulen ein. Während dieser Drehung wird in jeder Spule eine elektromotorische Kraft von bestimmter Richtung induzirt; durch passende Verbindung der Spulen können diese Kräfte addirt oder hintereinandergeschaltet werden. Bei weiterer Drehung um 180° aber verschwinden die Kraftlinien wieder aus ihrer umgekehrten Lage und kehren in die ursprüngliche zurück. Während dieser zweiten Hälfte der Bewegung wird daher eine elektromotorische Kraft von entgegengesetzter Richtung induzirt. Verbindet man die freien Enden der Spulen mit zwei isolirten Kupferringen auf der Drehungsaxe, so kann man durch Federn, die auf diesen Ringen schleifen, die Spulen mit einem äufseren Stromkreise verbinden. Bei dauernder Drehung zirkulirt in diesem dann ein Strom, der nach jeder halben Umdrehung seine Richtung wechselt, und zwischen diesen Umkehrpunkten in seiner Stärke ansteigt und wieder abfällt. Einen

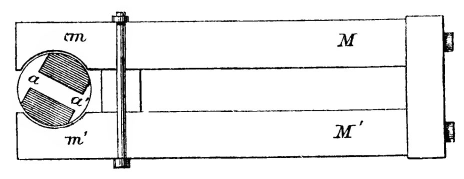



Fig. 248.
Magnetelektrische Maschine von Siemens & Halske.

solchen Strom nennt man einen Wechselstrom. Man kann aber die beiden entgegengesetzten Teile oder „Phasen" dieses Wechselstromes auch in zwei gleichgerichtete Phasen verwandeln, indem man die Enden der Spulen statt mit den isolirten Schleifringen mit einem Kommutator von derselben Konstruktion verbindet, die wir bereits an dem elektromagnetischen Motor (252) kennen gelernt haben.

Eine bessere Ausnutzung des Magnetfeldes und dementsprechende stärkere Wirkung erzielt man mit der magnetelektrischen Maschine von Siemens & Halske. Zwei Reihen wagrechte Magnetstäbe *MM'* (Fig. 248) sind an einer lotrecht stehenden Eisenplatte befestigt und an ihren vorderen Enden bei *mm'* derart ausgedreht, dafs die hierdurch gebildete cylindrische Höhlung den „Cylinderinduktor" aufzunehmen vermag. Dieser besteht aus einem Eisenkern, dessen Gestalt aus einem doppel-T-förmigen Querschnitt *aa'* zu erkennen ist; in seine seitlichen Ausbuchtungen kommen die Drahtwindungen der Länge nach zu liegen; das Ganze ist von einer schützenden Messinghülle umgeben, die oben und unten die Zapfen der Drehungsachse trägt.

Diese Maschinen liefern bei Anwendung eines Kommutators zwar einen stets gleichgerichteten Strom, aber keinen konstanten,

sondern einen pulsirenden, in seiner Intensität periodisch auf- und abschwankenden Strom.

Ein wesentlicher Fortschritt im Bau magnetelektrischer Maschinen wurde durch die Einführung des Pacinottischen (1860) oder Grammeschen (1871) Ringankers erzielt. Bei der Grammeschen Maschine (Fig. 249) dreht sich zwischen den Polen $N$ und $S$

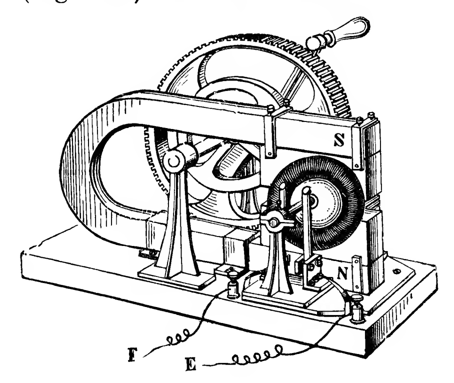



Fig. 249.
Magnetelektrische Maschine von Gramme.

eines hufeisenförmigen Magnets um eine zur Ebene seiner Schenkel senkrechte Achse ein Ring von weichem Eisen $ABCD$ (Fig. 250), auf den eine Anzahl von Drahtspulen aufgeschoben ist, von denen

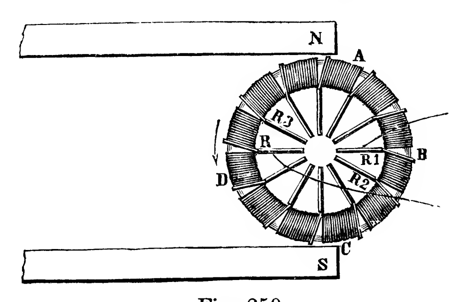



Fig. 250.
Zur Grammeschen Maschine.

jede mit der folgenden in fortlaufender Verbindung steht. Von den Verbindungsstellen je zweier benachbarter Spulen laufen metallische Fortsätze $RR_1 R_2 R_3$ zur Achse des Ringes, wo sie rechtwinkelig umgebogen und isolirt voneinander auf der Achse parallel zu ihr befestigt sind. Zwei Drahtbündel oder Bürsten (in der Figur 250 angedeutet durch von $R$ und $R_1$ auslaufende Drähte) schleifen federnd beiderseits auf diesem Teil der Achse, den man den Kollektor nennt, und nehmen die während der Umdrehung in den Spulen erregten Induktionsströme auf. Unter dem Einfluſs des Magnets wird nämlich

der Ring selbst magnetisch, und zwar so, dafs er gleichsam aus zwei halbkreisförmigen Magneten *ABC* und *ADC* besteht, welche in *A* und *C* mit gleichnamigen Polen zusammenstofsen und in *B* und *D* ihre neutralen Stellen haben. Die Lage dieser Pole ändert sich während der Umdrehung des Ringes nicht, da ja das weiche Eisen seine Magnetisirung nicht festhält; die Wirkung ist somit die nämliche, als ob der Eisenring mit einem Südpol bei *A* und einem Nordpol bei *C* unbeweglich stehen bliebe und blofs die Drahtspulen längs desselben dahinglitten. Dabei schwankt die Zahl der Kraftlinien in den Spulen periodisch auf und ab. Sie ist am gröfsten in den Punkten *B* und *D*, gleich Null in den Punkten *A* und *C*, in denen die Richtung der Kraftlinien in Beziehung zur Spulenachse sich bei der Bewegung der Spulen umkehrt. Daher hat die in-

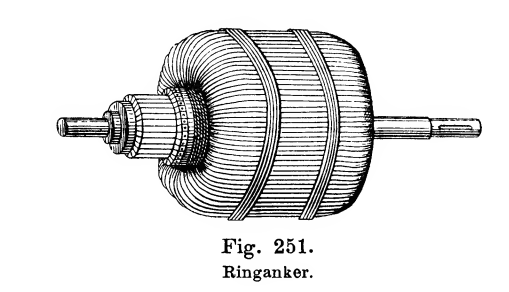


Fig. 251.
Ringanker.

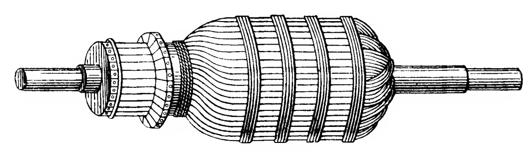


Fig. 252.
Trommelanker.

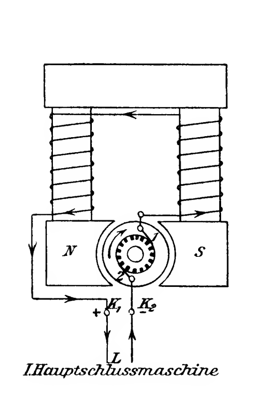
duzirte elektromotorische Kraft in allen Spulen der unteren Hälfte die eine, in allen der oberen Hälfte die entgegengesetzte Richtung. Die Spulen jeder Hälfte verhalten sich wie hintereinandergeschaltete Elemente, sie addiren ihre elektromotorischen Kräfte. Die beiden Hälften aber halten sich mit ihren entgegengesetzten Kräften in sich das Gleichgewicht und wirken auf den äufseren Stromkreis wie zwei parallel geschaltete Reihen von Elementen, von denen jede die Hälfte des äufseren Stromes liefert. Fig. 251 zeigt die Ausführung eines derartigen Ringankers mit dem Kollektor.

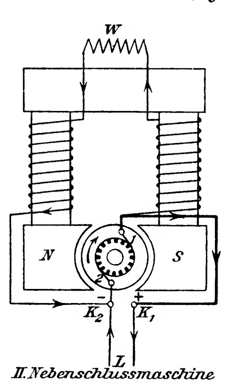
Beim Grammeschen Ring schneiden nur die an der Aufsenseite des Ringes befindlichen Teile der Drahtwindungen die Kraftlinien. Die Induktionswirkung beschränkt sich daher auf diese Teile, und die auf der Innenseite befindlichen Stücke der Drahtwindungen dienen nur zur Rückleitung. In dieser Beziehung zweckmäfsiger und aufserdem leichter herzustellen ist der Trommelanker von Hefner-Alteneck (Fig. 252).

Er ist gewissermaſsen aus dem Doppel-T-Anker von Siemens & Halske (Fig. 248) hervorgegangen, indem er auch aus einem cylindrischen Eisenkern besteht, der der Länge nach mit Draht umwickelt ist; doch trägt er nicht eine Spule, sondern eine gröſsere Anzahl von Spulen, deren Windungsebenen um gleiche Winkel gegen einander gedreht sind, und die genau wie die Spulen des Grammeschen Ringes mit Hülfe eines Kollektors in zwei Reihen hintereinander geschaltet sind, so daſs auch hier die Ströme beider Hälften an den neutralen Punkten des Kollektors durch Schleifbürsten abgenommen werden können. Diese Art der Bewickelung ist die heutzutage übliche.

271. **Dynamoelektrische Maschinen.** Ring- und Trommelwickelung sind zuerst an magnetelektrischen Maschinen eingeführt worden. Natürlich erhält man wesentlich stärkere Wirkungen, wenn man statt der Stahlmagnete Elektromagnete benutzt. Es ist nun offenbar möglich, den im rotirenden Anker erzeugten Strom um diese Elektromagnete herumzuleiten, und zwar in solcher Richtung, daſs die Erregung der Elektromagnete dadurch verstärkt wird. Dabei fand W. Siemens (1862), daſs eine anfängliche Erregung dieser Elektromagnete durch eine besondere Stromquelle ganz entbehrlich ist. Der schwache auch im weichsten Eisen zurückbleibende Magnetismus der Elektromagnete reicht vielmehr hin, um beim Drehen des Ankers in diesem einen zunächst schwachen Induktionsstrom zu erregen, welcher den Magnetismus der Elektromagnete steigert und dadurch wiederum die Induktion verstärkt. Bei fortgesetzter Drehung wird nach diesem Prinzip die Stromstärke im Schlieſsungskreis bis zu einer Grenze gesteigert, welche durch die Sättigung der Magnete und andere Umstände bedingt ist. Die Aufstellung dieses dynamoelektrischen Prinzips durch W. Siemens bildete die Grundlage für die Entwickelung der modernen Elektrotechnik. Nach diesem Prinzip sind die dynamoelektrischen Maschinen (Dynamomaschinen oder auch bloſs Dynamos) gebaut, die heutzutage oft in gewaltigen Dimensionen zur Erzeugung elektrischer Ströme benutzt werden. Dabei liegt eine dreifache Möglichkeit der Anwendung des dynamoelektrischen Prinzipes vor und man unterscheidet demgemäſs drei verschiedene Typen von Dynamomaschinen, die durch die drei Schemate der Fig. 253 erläutert werden mögen. Man kann erstens den Strom, der aus dem rotirenden Anker bei Bürste 1 herauskommt, zunächst um die Feldmagnete herumleiten, von da zur positiven Polklemme $K_1$ der Maschine, von der aus er in die Gebrauchsleitung strömt, um von ihr zur negativen Polklemme $K_2$ und der Bürste 2 zurückzukehren (Hauptschluſs-, Serien- oder Reihenmaschine, weil Anker und Magnetwickelung hintereinander, in Serie oder Reihe geschaltet sind). Da bei unveränderlicher Umdrehungsgeschwindigkeit des Ankers die induzirte elektromotorische Kraft von der Stärke des Magnetfeldes abhängt, so steigt bei dieser Maschine die Betriebsspannung, wenn der äuſsere Widerstand sinkt, und infolgedessen die

Stromstärke steigt, während bei grofsem äufseren Widerstand die Spannung nahezu auf Null heruntersinkt. Bei dem zweiten Typus wird der Strom von den Bürsten unmittelbar zu den Polklemmen und der äufseren Leitung geführt; die Magnetwickelung aber besteht aus zahlreichen Windungen eines dünneren Drahtes und ist ebenfalls an die Bürsten angeschlossen; sie liegt also parallel, oder im Nebenschlufs zur äufseren Leitung (Nebenschlufsmaschine). Der Strom, der aus dem Anker kommt, teilt sich; der kleinere Teil geht durch die Magnetwickelungen, der Hauptanteil in die äufsere Leitung. Da beim Durchgange des Stromes durch den Anker infolge des Ankerwiderstandes ein Bruchteil der induzirten elektromotorischen Kraft verbraucht wird, und zwar um so mehr, je mehr Strom durch den



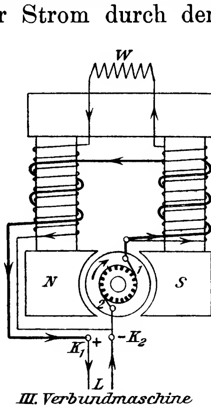




Fig. 253.
Typen der Dynamomaschinen.

Anker hindurchfliefst, so sinkt die Spannung an den Bürsten, die Klemmspannung, mit wachsender Stromentnahme; infolgedessen nimmt der Strom in den Magnetwickelungen ab und die induzirte elektromotorische Kraft im Anker sinkt. Diese Maschinen zeigen also gerade das umgekehrte Verhalten wie die Hauptschlufsmaschinen. Wird der äufsere Widerstand sehr klein, so sinkt die Erregung auf Null herunter. Um die Klemmspannung bei veränderlicher Stromentnahme auf gleichem Werte halten zu können, fügt man in die Magnetwickelung einen regulirbaren Widerstand ($W$) ein, den Nebenschlufsregulator (Edison). Man kann aber auch die beiden in ihren Wirkungen entgegengesetzten Schaltungen vereinen (Typus III, Verbund- oder Compoundmaschine). Hier ist der Hauptstrom mit wenigen starken Windungen um die Feldmagnete herumgeführt; aufserdem haben diese noch die Nebenschlufswickelung. Beide können so gegeneinander abgeglichen werden, dafs die Maschine innerhalb weiter Grenzen mit unveränderlicher Klemmspannung arbeitet.

272. **Elektromotoren. Elektrische Kraftübertragung.** Leitet man den Strom einer Dynamomaschine durch die Bewickelung einer zweiten, so gerät diese in Umdrehung und kann nun als elektro-

magnetischer Motor (Elektromotor) mechanische Arbeit verrichten. Im rotirenden Anker eines Elektromotors sind natürlich die gleichen Induktionswirkungen vorhanden, wie sie in der Dynamomaschine zur Stromerzeugung benutzt werden. Sie äufsern sich, entsprechend dem Lenzschen Gesetze (260), als gegenelektromotorische Kraft, welche die den Motor antreibende elektromotorische Kraft zu vermindern bestrebt ist, um so mehr je schneller der Anker sich dreht, während andererseits in der Dynamomaschine die elektromagnetische Rückwirkung zwischen dem induzirten Strom und den Feldmagneten der Bewegung des Ankers entgegenwirkt und durch einen entsprechenden Energieaufwand der Antriebsmaschine überwunden werden mufs. Läfst man eine bestimmte elektromotorische Kraft $E$ auf einen Elektromotor wirken, so geht bei festgehaltenem Anker ein Strom durch den Motor hindurch, der allein durch den Widerstand des Motors bestimmt ist. Läfst man nun den Anker los, so gerät er in Drehung und die Stromstärke sinkt. Hat der Motor keine andere Arbeit zu leisten als die Überwindung seiner eigenen Reibungswiderstände, so wird er in sehr schnelle Drehung kommen und die Stromstärke wird auf einen sehr kleinen Betrag $i_0$ heruntergehen. Die Arbeit, die die wirkende elektrische Kraft in diesem Falle leistet, die sogenannte Leerlaufsarbeit, ist dann gleich $E i_0$. Wird der Motor aber „belastet", d. h. mufs er als Antriebsmaschine äufsere Arbeit leisten, so vermindert sich seine Umdrehungsgeschwindigkeit, die Stromstärke steigt auf einen höheren Wert $i$, damit wächst die Zugkraft, die die Feldmagnete auf den Anker ausüben, und desgleichen steigt die Arbeitsleistung der treibenden elektrischen Kraft auf $Ei$. Von diesem Arbeitsaufwande aber wird nur ein Teil als nutzbare Arbeit gewonnen, da stets ein gewisser Bruchteil für die Unterhaltung des Stromes im Motor aufgewandt werden mufs und als Joulesche Wärme in den Drahtwindungen des Motors verloren geht.

Ist $E$ die angelegte elektromotorische Kraft, $J$ die Stromstärke bei stillstehendem Motor, so leistet die Kraftquelle eine Arbeit $E \,.\, J$ (234), die ganz auf Erzeugung von Wärme im Betrage $J^2 \,.\, w$ oder $E^2/w$ verwendet wird; denn die Stromstärke $J$ ist in diesem Falle nach dem Ohmschen Gesetze $= E/w$, wenn $w$ den Widerstand des Motors bedeutet. Dreht sich der Motor, so entsteht eine von seiner Umdrehungsgeschwindigkeit abhängige elektromotorische Gegenkraft $e$; der Strom ist infolgedessen $i = (E - e)/w$. Die Arbeit aber, welche die Batterie leistet, ist $= E \,.\, i = (E^2 - E e)/w$. Die im Stromkreis erzeugte Wärme beträgt jetzt $i^2 \,.\, w = (E - e)^2/w$. Dieser Wert ist kleiner als die von der Batterie geleistete Gesamtarbeit, um den Betrag $e(E - e)/w = e \,.\, i$. Dieser nicht in Wärme umgesetzte Anteil der Leistung findet sich in der mechanischen Arbeit des Motors wieder.

Man kann auf diese Weise die Arbeit einer stationären Dampfmaschine, eines Wassergefälles etc., indem man sie mittels einer ersten Dynamo in Stromenergie umsetzt, auf beträchtliche Entfernung übertragen, wie z. B. bei der elektrischen Eisenbahn, in deren Wagengestell die zweite als Motor wirkende Dynamomaschine angebracht ist, welche die Räder umdreht.

Die Leitung starker Ströme auf sehr grofse Entfernungen bietet übrigens erhebliche praktische Schwierigkeiten. Wird an der entfernten Station eine bestimmte Stromstärke erfordert, so mufs man dem kupfernen Leitungsdraht bei doppelter Länge auch den doppelten Querschnitt geben, damit sein Widerstand der gleiche bleibe, und man braucht das vierfache Gewicht an Kupfer. Die Kosten der Leitung nehmen also mit dem Quadrate der Entfernung zu, und man erreicht sehr schnell eine Grenze, bei welcher die Anlage nicht mehr wirtschaftlich ist. Bei der Kraft- oder richtiger Arbeitsübertragung kommt es aber in erster Linie nicht darauf an, eine gewisse Stromstärke oder eine gewisse Spannung, sondern das Arbeitsvermögen oder die Energie des Stromes ohne zu grofse Verluste nach der entfernten Station überzuführen. Diese Energie ist aher durch das Produkt aus Spannung und Stromstärke (in Voltampère oder Watt) ausgedrückt, und bleibt sonach ungeändert, wenn die Spannung erhöht und die Stromstärke in demselben Verhältnis vermindert wird. Bei doppelter Spannung z. B. ist zur Übertragung derselben Arbeitsmenge nur die halbe Stromstärke erforderlich, und der Querschnitt wie das Gewicht der Kupferleitung vermindert sich auf ein Viertel.

Zur Überwindung grofser Entfernungen mufs man also Ströme von hoher Spannung und geringer Stromstärke anwenden (Marcel Deprez, 1882). Die Konstruktion von Gleichstrommaschinen für hohe Spannung ist jedoch mit grofsen Schwierigkeiten verbunden. Dagegen können Maschinen, welche Wechselstrom erzeugen, für hochgespannte Ströme wesentlich leichter hergestellt werden; daher wird für Kraftübertragung auf grofse Entfernungen heutzutage vorzugsweise Wechselstrom angewandt. Die Wechselstrommaschinen beruhen auf demselben einfachen Prinzip der Stromerzeugung durch Induktion, das wir oben bei den magnetelektrischen Maschinen (270) bereits kennen gelernt haben; doch werden natürlich statt der Stahlmagnete Elektromagnete angewandt, die von einer besonderen Stromquelle erregt werden müssen; und ferner werden statt eines Magnetes und eines Spulenpaares viele Magnete und Spulenpaare in einer Maschine vereinigt. Die grofsen in der Elektrotechnik gebrauchten Wechselstrommaschinen sind im wesentlichen folgendermafsen eingerichtet. Längs einem Radkranz sind eine Anzahl von Drahtspulen angeordnet, welche bei der Drehung des Rads zwischen zwei feststehenden Radkränzen rotiren, an deren jedem in gleicher Lage Elektromagnete befestigt sind. Diese Elektromagnete, durch eine Gleichstrom-Dynamomaschine erregt, sind derart geschaltet, dafs sowohl die nebeneinanderliegenden wie die einander gegenüberstehenden Magnetpole entgegengesetzte Polarität haben, so dafs jedem Südpol ein Nordpol gegenüber und zwischen zwei Nordpolen ein Südpol steht. Wird der Spulenkranz in gleichförmige Drehung versetzt, so entstehen in dem Bewickelungsdraht Wechselströme, die für sämtliche Spulen hintereinander geschaltet und von zwei Schlufsringen der Achse abgenommen werden.

273. **Transformatoren.** Für die Fortleitung und Verteilung der elektrischen Energie bietet der Wechselstrom noch einen anderen außerordentlichen Vorteil. Leitet man ihn durch eine Spule, die auf einen Eisenkern gewickelt ist, so wird in einer zweiten Spule, die die erste umgibt, oder die auf denselben Eisenkern, etwa auf eine andere Stelle eines geschlossenen eisernen Ringes, gewickelt ist, durch einfache Induktionswirkung, wie in einem Induktionsapparate, ebenfalls ein Wechselstrom hervorgerufen. Diese sekundäre Spule kann nun als Stromquelle für einen zweiten, mit dem ersten direkt gar nicht verbundenen Stromkreis benutzt werden. Man ist also in der Lage mit einem einzigen Wechselstromkreis eine Anzahl von einander ganz unabhängiger Stromkreise zu speisen. Außerdem aber hat man es mit diesen Apparaten, die Umformer oder Transformatoren genannt werden (Gaulard und Gibbs, 1887) in der Hand, dem sekundären Strome eine beliebige andere Spannung zu erteilen, als sie der gegebene primäre Strom besitzt. Man kann, wie bei den Induktionsapparaten, die sekundäre Spule aus vielen Windungen eines dünneren Drahtes herstellen und erhält dadurch eine höhere Spannung, als die des gegebenen Stromes ist. Man kann aber auch die Spannung „heruntertransformiren", indem man den gegebenen Strom durch eine Spule von vielen Windungen schickt, und den sekundären aus einer Spule von geringerer Windungszahl entnimmt. Sitzen die beiden Spulen auf einem in sich geschlossenen Eisenkern, so daß die in der einen Spule erzeugten magnetischen Kraftlinien möglichst vollzählig auch durch die andere Spule hindurchgehen, so verhalten sich die Spannungen in den beiden Spulen sehr nahe wie die Windungszahlen der Spulen. Zugleich mit dieser Umformung der elektromotorischen Kraft vollzieht sich eine Umformung der Stromstärken im umgekehrten Sinne. Denn die elektrische Energie, die dem einen Stromkreise entnommen wird, wird fast ungeschmälert auf den anderen übertragen; daher muß das Produkt aus Stromstärke und Spannung in beiden Stromkreisen das gleiche sein. Durch solche Transformatoren verwandelt man also schwache Ströme von hoher Spannung in starke Ströme von niedriger Spannung und umgekehrt. Mit ihrer Hülfe transformirt man den Strom einer Wechselstrommaschine auf diejenige hohe Spannung, deren man zu seiner Fortführung auf große Entfernungen bedarf, und transformirt ihn an der Verbrauchsstelle wieder auf diejenige niedrige Spannung herunter, die für die praktische Verwendung zu Beleuchtungs- oder Arbeitszwecken erforderlich ist.

274. **Drehstrom-Motoren.** Der von einer Wechselstrommaschine gelieferte und nach Bedürfnis transformirte hin- und herpulsirende Strom kann ebenso gut wie ein Gleichstrom unmittelbar zum Betriebe von Bogen- und Glühlampen verwendet werden. Behufs Kraftübertragung müßte man ihn durch eine ganz gleiche zweite Wechselstrommaschine leiten, welche genau auf die gleiche Umdrehungszahl wie die erste Maschine gebracht ist; denn nur dann kann sich die

Stromrichtung in den Spulen gleichzeitig (synchron) mit den Polen der Elektromagnete umkehren, was notwendig ist, wenn die Kraft den Spulenkranz immer in gleicher Richtung antreiben soll. Wird dieser Einklang, etwa durch gröfsere Belastung des Motors, im mindesten gestört, so wechselt die Kraft ihre Richtung, hält den Spulenkranz zurück, statt ihn vorwärts zu treiben, und der Motor bleibt stehen.

In einfacher Weise wurde die Aufgabe der Kraftübertragung mittels hochgespannter Wechselströme gelöst durch die Erfindung der Drehstrom-Motoren (Ferraris, 1887, Dolivo-Dobrowolsky, 1890). Ein feststehender Eisenring trägt zwei im rechten Winkel zu einander gestellte Spulenpaare *AA* und *BB* (Fig. 254). Durch jedes Spulen-

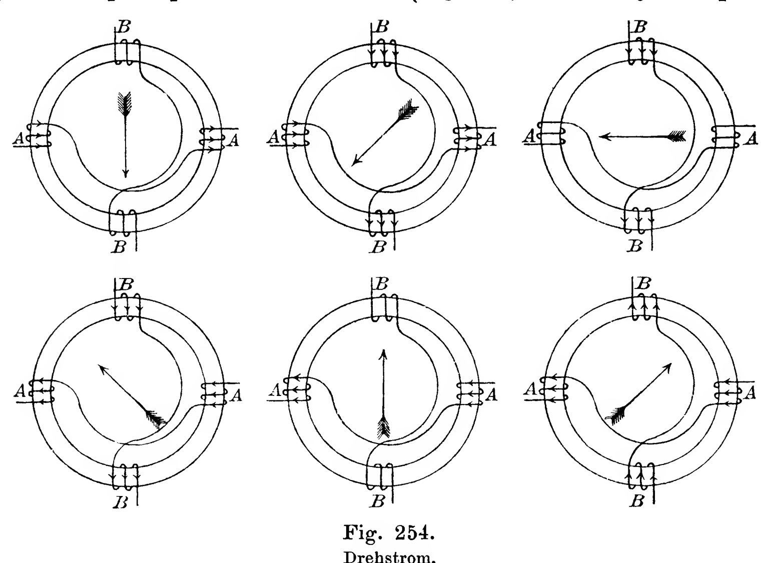



Fig. 254.
Drehstrom.

paar geht je ein Wechselstrom, von denen der eine um eine Viertel-Schwingungsperiode hinter dem anderen zurückbleibt, so dafs die Stromstärke in *A* ihren gröfsten Wert hat, wenn sie in *B* gleich Null ist, und umgekehrt. In dem Augenblick, in welchem dies der Fall ist (erste Figur), erzeugen die Spulen *A* Magnetpole in *B*, und im Innern des Ringes entsteht ein magnetisches Feld, dessen Kraftlinien die durch den Pfeil angedeutete Richtung haben. Eine Achtelperiode später sind die Ströme in beiden Spulenpaaren gleichstark, und erzeugen ein Magnetfeld von der in der zweiten Figur dargestellten Lage. Nach einer Viertelperiode ist die Stromstärke am gröfsten in *BB* und gleich Null in *AA*; hier bilden sich jetzt die Pole, und das Feld nimmt die in der dritten Figur angegebene Richtung an. Nach drei Achtelperioden hat der Strom in *AA* seine Richtung umgekehrt, und das Feld bekommt die in der vierten Figur dargestellte Lage.

So setzt sich die Drehung des Magnetfeldes fort, bis es nach Ablauf einer ganzen Periode wieder in die in der ersten Figur angegebene Lage zurückgekehrt ist (fünfte und sechste Figur). Bringt man nun innerhalb des Eisenringes einen um seine Achse drehbaren Eisencylinder (mit oder ohne Drahtbewickelung) an, so wird derselbe durch das sich drehende Magnetfeld mitgenommen. Ein solcher „Drehstrommotor“ ist die denkbar einfachste elektromagnetische Maschine.

Durch Einrichtungen der geschilderten Art gelang es 1891 der Allgemeinen Elektricitäts-Gesellschaft Berlin im Verein mit der Maschinenfabrik Oerlikon, eine Arbeitsmenge von ca. 300 Pferdekräften von Lauffen am Neckar bis zur elektrotechnischen Ausstellung in Frankfurt a. M. auf eine Entfernung von 175 km zu übertragen. Eine Turbine von 300 Pferdekräften bewegte in Lauffen eine Wechselstrommaschine, die einen („dreiphasigen“) Drehstrom von im ganzen 150 Volt Spannung und 1400 Ampère Stromstärke, also eine Stromenergie von ca. 200000 Voltampère lieferte. Dieser Strom wurde

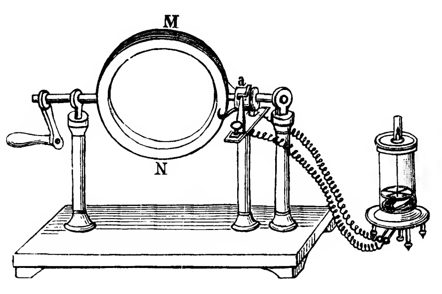



Fig. 255.
Erdinduktor.

auf ca. 20000 Volt Spannung transformirt und durch drei blanke Kupferdrähte von nur 4 mm Durchmesser wohl isolirt in die Ferne geleitet. In Frankfurt wurde durch Transformatoren die Spannung auf 100 Volt herabgesetzt unter entsprechender Erhöhung der Stromstärke; ein Teil des transformirten Stromes speiste 1000 Glühlampen, ein anderer Teil setzte durch einen Drehstrommotor eine Pumpe in Bewegung, die einen Wasserfall von 10 m Höhe betrieb. Der letztere Teil der elektrisch übertragenen Kraft vollendete also einen vollständigen Kreislauf; denn ein Teil der Energie des Wasserfalls in Lauffen erschien in Frankfurt wieder als Energie eines Wasserfalls.

275. **Erdinduktion.** Auch der Erdmagnetismus erzeugt in einem geschlossenen Leiter, der im gleichmäfsigen Magnetfelde der Erde in geeigneter Weise bewegt wird, Induktionsströme. Als Erdinduktor kann ein kreisförmiger Rahmen *MN* (Fig. 255) von möglichst grofsem Durchmesser dienen, auf dessen Umfang zahlreiche Windungen eines übersponnenen Kupferdrahts gewickelt sind, und der mittels Kurbel um einen Durchmesser als Achse drehbar ist. Steht diese Achse senkrecht zum magnetischen Meridian und die Ebene des

Rahmens senkrecht zur Inklinationsrichtung, und dreht man die Achse rasch um eine halbe Umdrehung, so beobachtet man an einem eingeschalteten (ballistischen) Galvanometer einen Induktionsstrom, dessen Stärke der Gesamtintensität des Erdmagnetismus proportional ist. Dreht man nun ebenso rasch um eine halbe Umdrehung weiter (oder auch zurück), so entsteht ein Induktionsstrom von gleicher Stärke aber entgegengesetzter Richtung. Bewirkt man letztere Drehung gerade in dem Augenblick, in welchem die durch den ersten Induktionsstofs abgelenkte Galvanometernadel zurückschwingend die Gleichgewichtslage passirt, so wird die Ablenkung nach der entgegengesetzten Seite gröfser, weil die Nadel schon in Bewegung war, als sie den zweiten Induktionsstofs empfing. Setzt man dieses „Multiplikationsverfahren“ fort, so erreicht man nach einiger Zeit eine gröfste Ablenkung, welche als Mafs für die Stärke des Erdmagnetismus betrachtet werden kann.

Stellt man die Ebene der Windungen horizontal und die Umdrehungsachse in den magnetischen Meridian, so kann bei einer halben Umdrehung nur die vertikale Komponente ($V$) des Erdmagnetismus induzirend wirken. Stellt man dagegen die Drehungsachse vertikal und die Ebene des Rahmens senkrecht zum magnetischen Meridian, so wirkt bei jeder Drehung um $180^0$ nur die horizontale Komponente ($H$) des Erdmagnetismus. Die in beiden Fällen beobachteten Galvanometer-Ablenkungen verhalten sich daher wie diese Komponenten (wie $V:H$). Durch dasselbe Verhältnis wird aber auch die Tangente des Inklinationswinkels ausgedrückt ($tg i = V:H$). Durch dieses von W. Weber (1838) angegebene Verfahren kann also die magnetische Inklination mittels des Erdinduktors bestimmt werden.

Wird der Apparat so gestellt, dafs die Drehungsachse in die Inklinationsrichtung fällt, so erhält man am Galvanometer keine Ablenkung. In den beiden Hälften des Drahtkreises zu beiden Seiten der Drehungsachse entstehen nämlich, weil sie die Kraftlinien des Feldes in entgegengesetzter Richtung durchschneiden (270), entgegengesetzte Induktionsströme, welche sich gegenseitig aufheben.

276. **Bestimmung der absoluten Einheit des Widerstandes mittels des Erdinduktors.** Wie früher (270) gezeigt worden, ist die Grösse der in einem Drahtkreis inducirten elektromotorischen Kraft durch die Zahl der in der Sekunde in die Fläche des Drahtkreises eintretenden oder austretenden magnetischen Kraftlinien bestimmt. Hat man einen Drahtkreis in einer zum magnetischen Meridian senkrechten Lage, so gehen durch seine Fläche $F$, wenn $H$ die horizontale Intensität des Erdmagnetismus ist, eine Anzahl $FH$-Kraftlinien hindurch. Dreht man diesen Drahtkreis um eine verticale Axe um $90^0$, so gehen in dieser neuen Lage gar keine Kraftlinien mehr durch den Drahtkreis hindurch. Danach beträgt, wenn die Drehung in der Zeit $\tau$ vollzogen wurde, die mittlere elektromotorische Kraft des Induktionsstromes

$$e = \frac{FH}{\tau}$$

und läfst sich danach, wenn die Horizontalintensität bekannt und die „Windungsfläche“ durch Ausmessung ermittelt ist, in absolutem Mafse berechnen. **Wird**

nun noch die Stromstärke $i$ in absolutem Maſse galvanometrisch bestimmt (246), so ergibt sich aus dem Ohmschen Gesetz der Widerstand der gesamten Leitung

$$r = \frac{e}{i}$$

ebenfalls in absolutem Maſse. Das $10^9$fache der so bestimmten Widerstandseinheit ist ein Ohm (W. Weber).

277. **Induktion in körperlichen Leitern. Foucaultsche Ströme. Rotationsmagnetismus.** Nicht nur in geschlossenen Drahtwindungen, sondern auch in jedem körperlichen Leiter, gegen welchen ein naher Magnet seine Lage ändert, werden Ströme (Foucaultsche Ströme) von solcher Richtung induzirt, daſs sie die gegenseitige Bewegung von Leiter und Magnet zu hemmen streben. Führt man z. B. ein Messingblech zwischen den Polen eines starken Elektromagnets hindurch, so fühlt man einen Widerstand, als wenn man durch eine zähe Substanz, wie Käse, hindurchschnitte. Eine Kupferscheibe, welche man zwischen den Polen in rasche Rotation versetzt hat, wird plötzlich zum Stillstand gebracht, wenn der Elektromagnet erregt wird. Die Bewegungsenergie, welche der Leiter durch diesen „magnetischen Reibungswiderstand" verliert, wird, wie bei der gewöhnlichen Reibung, in Wärme (Joulesche Wärme) verwandelt: der bewegte Leiter erwärmt sich. Ein mit leicht schmelzbarer Metalllegirung ausgegossener kupferner Hohlcylinder, zwischen den Polen in rasche Umdrehung versetzt, erhitzt sich so stark, daſs die Metalllegirung schmilzt.

Die Rückwirkung der in einem bewegten Leiter durch einen Magnet induzirten Ströme vermag auch den letzteren in Bewegung zu setzen. Über einer wagrechten Kupferscheibe, die durch die Centrifugalmaschine in rasche Umdrehung versetzt werden kann, befinde sich eine in horizontaler Ebene drehbare Magnetnadel. Wird die Kupferscheibe gedreht, so dreht sich auch die Nadel in demselben Sinne wie die Scheibe. Ebenso nimmt auch ein wagrechter Magnet, der um eine vertikale Achse rasch rotirt, eine über ihm in wagrechter Ebene drehbare Kupferscheibe mit sich. Arago (1825) bezeichnete diese von ihm entdeckten und erst später von Faraday durch Induktionsströme erklärten Erscheinungen als Rotationsmagnetismus.

Diese Induktionswirkungen treten in allen Metallmassen auf, die wechselnder Magnetisirung unterworfen sind und führen Erwärmungen und entsprechende Energieverluste herbei. Man vermeidet sie, indem man die Metallmassen in solcher Weise unterteilt, daſs diese Foucault- oder Wirbelströme nicht zu Stande kommen können. Aus diesem Grunde werden die Eisenkerne der Induktionsapparate, der Transformatoren, des Ankers der Dynamomaschinen und Motoren nicht aus ganzen Eisenstücken hergestellt, sondern aus Drähten oder Blechen, die durch dünne isolirende Schichten voneinander getrennt sind.

278. **Dämpfung.** Läſst man einen wagrecht aufgehängten Magnetstab innerhalb einer feststehenden kupfernen Hülse schwingen, so wirken die in der Hülse von ihm induzirten Foucaultschen Ströme hemmend auf seine Bewegung ein, und er kommt weit eher zur Ruhe, als wenn man ihn frei schwingen lieſse. Von diesem Mittel zur Dämpfung der Schwingungen macht man bei Galvanometern Gebrauch, um zu bewirken, daſs der Magnet sich rasch in seine Gleichgewichtslage einstelle (vgl. Fig. 183 *a* und *b*). Ist die Dämpfung so stark, daſs der Magnet sofort, ohne hin und her zu schwingen, sich einstellt, so heiſst das Galvanometer „aperiodisch“.

279. **Das Telephon** (Fernsprecher, Reis, 1861) übermittelt durch Induktionsströme gesprochene Worte oder andere Laute deutlich hörbar an eine entfernte Station. Das Bellsche Telephon (1875) besteht aus einem Stahlmagnet *A* (Fig. 256), auf dessen durch ein weiches Eisenstück verlängerten Pol eine Spirale *B* aus dünnem Draht aufgeschoben ist. Vor diesem Pole ist eine kreisförmige dünne Platte *EE* von weichem Eisen mit ihrem Rande rings eingeklemmt, welche, wenn man durch das davor befindliche Mundstück gegen sie spricht, wie ein Trommelfell in Schwingungen versetzt wird. Die periodischen Änderungen, welche durch die zitternden Bewegungen der Platte im Felde des Magnets hervorgebracht werden, erzeugen in der Drahtspule entsprechende Induktionsströme, welche durch die in die Holzhülle eingebetteten Drähte *CC* und durch eine mittels der Klemmen *DD* eingeschaltete Drahtleitung nach der entfernten Station fortgepflanzt werden, dort die Drahtspule eines ganz gleichen Instruments umkreisen, und das Feld seines Magnets in gleichem Rhythmus ändern. Hierdurch wird die Eisenplatte des zweiten Telephons in ganz übereinstimmende durch das jetzt als Schalltrichter dienende Mundstück hörbare Schwingungen versetzt. Der an der Ausgangsstation hervorgebrachte Klang, z. B. derjenige der menschlichen Stimme, wird auf diese Weise mit allen Eigentümlichkeiten seiner Klangfarbe nach der Empfangstation fortgepflanzt.

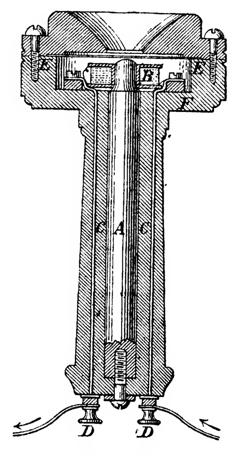


Fig. 256.
Telephon.

Das Telephon bleibt stumm, wenn man durch seine Drahtwindungen einen konstanten Strom leitet; nur beim Schlieſsen und Öffnen desselben hört man ein Knacken. Es tönt nur, wenn man einen intermittirenden oder einen Wechselstrom durchleitet, oder überhaupt einen Strom, dessen Stärke periodischen Schwankungen unterworfen ist. Man kann daher das Telephon, da es auf Wechselströme antwortet, nach F. Kohlrausch (1880) bei der Messung des galvanischen Widerstandes in Elektrolyten (265) statt eines Elektro-

dynamometers in die Wheatstonesche Brücke einschalten; man hat alsdann den Widerstand des Rheostaten oder des Meſsdrahtes so lange abzuändern, bis das Telephon schweigt.

280. **Das Mikrophon** (Lüdtge, Hughes, 1878) in seiner einfachsten Form besteht aus einem an beiden Enden zugespitzten Stäbchen *k* (Fig. 257) aus Gaskohle, welches mit zwei an einem Brettchen befestigten Kohlenstückchen *K* und *K'* in loser Berührung ist. Die Kohlenstückchen *K* und *K'* sind mit den Enden eines Schlieſsungskreises verbunden, in welchen eine galvanische Batterie *B* und ein Telephon *T* eingeschaltet sind. Spricht man in der Nähe der Kohlenstückchen, so vernimmt man die Worte in dem Telephon. Die Ursache dieser Wirkung ist die Veränderung der Innigkeit der Berührung zwischen den Kohlen durch die Schallschwingungen, wodurch Änderungen des galvanischen Widerstandes und damit periodische Schwankungen der Stromstärke herbeigeführt und entsprechende Schwingungen der Eisenplatte des Telephons hervorgerufen werden.

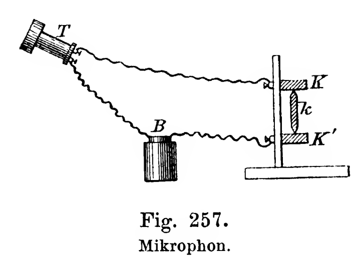


Fig. 257.
Mikrophon.

Im Fernsprechverkehr benutzt man als Sprechapparat ein Mikrophon (Transmitter), das Telephon selbst nur zum Hören. Von den zahlreichen Formen der gebräuchlichen Mikrophone sei hier nur der Universal-Transmitter von Berliner erwähnt. In einer dosenförmigen Gummikapsel befindet sich zwischen zwei horizontalen Kohlenplatten grobes Kohlenpulver, welches, wenn man durch einen Schalltrichter gegen die untere Platte spricht, mit Leichtigkeit den Schwingungen derselben folgt und entsprechende Schwankungen des Batteriestromes hervorruft. Dieser Strom geht aber nicht direkt durch die Drahtwindungen des Telephons, sondern durch die Hauptrolle eines kleinen in dem Gehäuse des Transmitters befindlichen Induktionsapparats, so daſs an jeder Station die daselbst stehende Batterie durch den Kohlenkontakt und diese Hauptrolle in sich geschlossen ist, während die Hörtelephone der beiden Stationen durch die Fernleitung unter sich und mit den Nebenrollen der Induktionsapparate verbunden sind. Durch die Schwankungen der Stromstärke in der Hauptrolle werden in der Nebenrolle Induktionsströme wachgerufen, welche das entfernte Telephon zu lautem Sprechen bringen. Das Mikrophon als Sprechapparat leistet, wie man sieht, den Dienst eines Relais (248), welches statt der sehr schwachen eigentlichen Telephonströme die gröſsere Stromenergie einer galvanischen Batterie zu verwenden gestattet. Der kleine Induktionsapparat wirkt als Transformator, welcher den starken Strom der Batterie in einen schwachen Strom von höherer Spannung umsetzt, der durch einen

dünnen Draht leicht in grofse Entfernung geleitet werden kann. Als Rückleitung wird wie beim Telegraphen nicht ein zweiter Draht, sondern die Erde benutzt.

281. **Der sprechende Lichtbogen.** Es ist in jüngster Zeit gelungen, noch auf einem anderen Wege Stromschwankungen in Schallschwingungen umzusetzen. Wenn man durch den Strom einer Accumulatorenbatterie oder einer Dynamomaschine unter Vorschaltung eines Regulirwiderstandes einen elektrischen Lichtbogen betreibt und den Strom aufserdem durch die eine Spule eines Transformators gehen läfst, während man durch die andere Spule den Batteriestrom eines Mikrophonkreises hindurchschickt, so übertragen sich die Stromschwankungen, die durch das Sprechen im Mikrophonkreis hervorgerufen werden, auf den Stromkreis der Bogenlampe. Der Lichtbogen, dessen Volumen und Temperatur durch die Stromstärke bedingt sind, kommt in entsprechende Schwankungen und diese gehen als Schallschwingungen an die Luft über. Der Lichtbogen spricht — bei richtiger Anordnung, so laut und deutlich, dafs man es in einem gröfseren Saal verstehen kann — alles, was in das Mikrophon hineingesprochen wird. (Simon, 1898.)

Die Stromschwankungen, die die Schallschwingungen erzeugen, bewirken natürlich auch entsprechende Schwankungen der Lichtstärke des Bogens. Leitet man die Strahlen der Bogenlampe mittels eines Reflektors auf eine entfernte Station und sammelt sie hier wieder mit Hülfe eines zweiten Hohlspiegels, so kann man die Lichtschwankungen des Bogens hier wieder in Schallschwankungen umsetzen. Ein Apparat, der dies ermöglicht, ist die Selenzelle (Bells Photophon). Das Selen hat nämlich die Eigentümlichkeit, durch Belichtung seinen elektrischen Widerstand zu vermindern (223). Schaltet man eine passend hergestellte Selenschicht in einen Stromkreis, der ein Element und ein Telephon enthält, so werden durch intermittirende Belichtungen Stromschwankungen erzeugt, die das Telephon in Schallschwingungen umsetzt. Auf diese Weise ist es möglich, das in das Mikrophon gesprochene Wort mit Hülfe des elektrischen Lichtbogens — ohne Drähte — in die Ferne zu senden und dort wieder hörbar zu machen (Lichttelephonie).

282. **Elektrische Schwingungen.** Wir verbinden die Pole der sekundären Spule eines Funkeninduktors mit den beiden Belegungen einer Leidener Flasche. Bei Unterbrechung des primären Stromes ladet dann der Induktionsstrom die Leidener Flasche, und diese Ladungen können sich in Form eines Funkens ausgleichen, wenn die Belegungen mit einer Funkenstrecke von passender Länge verbunden sind. Zieht man diese Funkenstrecke so weit auseinander, dafs keine Funken mehr übergehen, so werden die Ladungen der Belege sich offenbar rückwärts durch die sekundäre Spule hindurch wieder ausgleichen. Dieser Vorgang vollzieht sich aber nicht in Form eines einfachen Ausgleiches. Wenn der Rückflufs der Ladungen

sich zu einem Strom durch die Spule entwickelt hat, so hört dieser Strom nicht auf, wenn die Belege entladen sind, und die treibende Spannungsdifferenz damit auf Null gesunken ist. Sondern die Selbstinduktion der Spule (263) bewirkt, daſs der Strom noch weiter anhält und die Belege von neuem, aber entsprechend seiner Richtung in umgekehrtem Sinn, wie anfangs, ladet. Ist dies eingetreten und hat sich der Strom damit erschöpft, so sind die Belegungen wieder geladen, entgegengesetzt wie vorher. Der beschriebene Vorgang wiederholt sich nun in umgekehrter Richtung, die Elektricitäten strömen zurück; die Selbstinduktion ladet die Belege von neuem, dieses Mal wieder so, wie sie es zu Anfang waren, und so geht das Spiel der hin und her, von der einen Belegung auf die andere und wieder zurückströmenden Elektricitäten so lange, bis die Energie der ursprünglichen Ladung durch Stromwärme und andere Verluste verbraucht ist.

Daſs nicht ein einfacher Ausgleich, sondern diese wechselnden Ladungen stattfinden, kann man nachweisen mit Hülfe der Lichtenbergischen Staubfiguren. Verbindet man die eine Belegung der Leidener Flasche mit einer Metallspitze, die man auf eine Harzplatte aufsetzt, so erhält man durch einmalige Unterbrechung des Primärstromes auf der Platte nicht eine einfache, positive oder negative Staubfigur, sondern eine zusammengesetzte, die aus einer Reihe von abwechselnd positiven und negativen ineinander steckenden Figuren besteht (v. Bezold, 1870). Daſs diese Figuren den zeitlich aufeinander folgenden abwechselnden Ladungen der Belegung entsprechen, kann man ebenfalls leicht beweisen, indem man die Harzplatte während des Vorganges bewegt, etwa auf der Schwungmaschine rotiren läſst. Man erhält dann die abwechselnd positiven und negativen Figuren, statt ineinander steckend, hintereinander liegend.

Einen Vorgang der beschriebenen Art nennt man eine elektrische Schwingung. Sie kommt offenbar in einer ganz ähnlichen Weise zu stande, wie die Schwingung einer schweren Masse, die an einer elastischen Feder hängt (53). Wie es bei dieser die Trägheit ist, die die Masse über die Ruhelage hinausführt und die Feder von neuem dehnt oder zusammendrückt, so ist es bei jener die Selbstinduktion, die die elektrischen Ladungen über den Ausgleichspunkt hinweg auf die entgegengesetzten Belege hinüberführt. Wie die elastische, so haben auch die elektrischen Schwingungen eine bestimmte Schwingungsdauer; darunter versteht man die Zeit, die verstreicht von einer positiven Ladung des einen Beleges bis zur nächsten positiven Ladung desselben Beleges. Diese Zeit ist unabhängig von der Stärke der Ladung, wie sie bei den elastischen Schwingungen unabhängig von der Schwingungsweite ist. Wie sie bei diesen von dem Verhältnis der Masse zur wirkenden Kraft abhängt (S. 83), so hängt sie bei jener von dem Verhältnis der Selbstinduktion ($L$) zu derjenigen Gröſse ab, welche die treibende Kraft, nämlich die Spannungsdifferenz der Belege bestimmt. Diese Spannungsdifferenz ist aber bei gleicher Elektricitätsmenge umgekehrt proportional der Kapacität ($C$) der Flasche.

Für die Schwingungsdauer der elektrischen Schwingungen hat man daher, entsprechend der Formel auf S. 83:

$$T = 2\pi \sqrt{L \cdot C}.$$

Verbindet man die sekundäre Spule des Induktoriums statt mit einer, mit 4 Flaschen von derselben Gröfse, so ist die Dauer der elektrischen Schwingungen nunmehr doppelt so grofs. Nimmt man statt des ursprünglich benutzten Induktoriums ein kleineres, dessen Sekundärspule eine 4mal kleinere Selbstinduktion hat, so ist die Schwingungsdauer nur halb so grofs, wie anfangs. Bei einem mittelgrofsen Induktorium und einer grofsen Leidener Flasche ist die Schwingungsdauer von der Gröfsenordnung 0,01 Sekunde.

Schnellere Schwingungen erhält man mit kleineren Kapacitäten und kleineren Spulen. Ladet man eine Leidener Flasche und leitet den Entladungsschlag durch eine Spule hindurch, so ist auch dieser Vorgang ein oscillatorischer, selbst dann noch, wenn man die Spule durch eine einfache Drahtleitung ersetzt. Feddersen hat dies dadurch

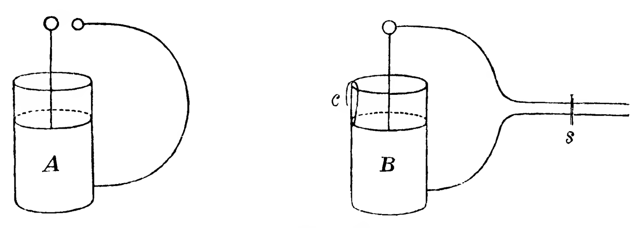



Fig. 258.

nachgewiesen (1858), dafs er den Entladungsfunken einer Leidener Flasche mit Hülfe eines sehr schnell rotirenden Spiegels auseinander zog und photographirte. Statt eines zusammenhängenden Funkenbandes zeigte dieses Bild eine Folge von Funken von abwechselnd umgekehrter Richtung. Man kann die Thatsache, dafs man es auch bei der Entladung einer Leidener Flasche durch einen kurzen Schliefsungskreis hindurch mit elektrischen Schwingungen zu thun hat, nach Lodge (1890) durch folgenden Versuch demonstriren. (Fig. 258). Zwei gleich grofse Leidener Flaschen werden nebeneinander aufgestellt. Die eine (*A*) hat als Verbindung zwischen den beiden Belegungen einen Drahtbügel mit einer Funkenstrecke. Bei der zweiten (*B*) sind die Belege durch einen ähnlichen Drahtbügel direkt verbunden; doch kann hier die Länge dieses Schliefsungskreises durch die verschiebbare Brücke *s* verändert werden, bei *c* bildet ein Stanniolstreifen von der inneren Belegung her eine Brücke nach der äufseren mit einer kleinen Funkenstrecke dazwischen. Wird *A* geladen und entladen sich die Belege durch den Schliefsungskreis und

die Funkenstrecke hindurch, so wirkt dieser Vorgang inducirend auf den Schliefsungskreis der zweiten Flasche. Aber nur bei einer bestimmten Lage der Brücke *s* wird die Wirkung in diesem Kreise so heftig, dafs bei *c* Funken überspringen. Verschiebt man *s* nach der einen oder der anderen Seite, so verschwinden die Funken in *c*. Eine solche Anpassung des einen Vorganges an den anderen ist nur erklärlich als eine Abstimmung auf gleiche Schwingungsdauer der elektrischen Schwingungen. Die Wirkung von *A* auf *B* wird dann durch Resonanz (308) so verstärkt, dafs die Funken in *c* auftreten.

Wie die Wechselströme einer Wechselstrommaschine, so lassen sich auch die hin- und hergehenden Ströme dieser elektrischen Schwingungen mittels eines geeigneten Transformators auf noch höhere Spannungen hinauftransformiren (Tesla, 1891). Zu dem Ende schaltet man in den Schliefsungsbogen der Leidener Flasche statt des einfachen Drahtes, wie er in Fig. 258 *A* gezeichnet ist, die aus wenigen weiten Windungen eines dicken kurzen Drahtes gewickelte primäre Rolle des Transformators ein; die sekundäre Rolle besteht aus einer Lage von vielen Windungen eines dünnen Drahtes, die auf einen Glas- oder Hartgummicylinder aufgewickelt sind. Die engere sekundäre Rolle ist von der weiteren primären entweder durch einen breiten Luftzwischenraum getrennt, oder beide Spulen werden zur besseren Isolirung in ein mit gut isolirendem Öl gefülltes Gefäfs gesenkt. Bei jeder Funkenentladung entstehen an den Polen der sekundären Rolle so hohe Spannungen, dafs aus ihnen, oder aus Drähten, die mit ihnen verbunden sind, bläuliche Lichtbündel hervorschiefsen. Geifslersche Röhren leuchten in der Nähe der Drähte oder zwischen zwei mit diesen verbundenen Metallplatten auch ohne unmittelbare Berührung (Tesla-Licht).

Bei solchen Flaschenentladungen durch kürzere Drähte hindurch beträgt die Schwingungsdauer nur noch Milliontel einer Sekunde, wie Feddersen festgestellt hat. Noch 100mal schnellere Schwingungen hat H. Hertz erhalten (1888), indem er Kapacität und Selbstinduktion noch weiter verkleinerte. Statt eines Kondensators benutzte er als Kapacität zwei isolirte Metallcylinder, die mit den Polen eines Induktoriums verbunden, durch dieses geladen werden und sich durch eine kleine Funkenstrecke zwischen ihren einander zugekehrten Enden entladen. Dafs auch diese Entladungen oscillatorisch waren, konnte, wie bei dem Versuche von Lodge, durch Resonanzwirkung auf einen zweiten abzustimmenden Leiter mit ganz kleiner Funkenstrecke nachgewiesen werden. Während aber die Schliefsungskreise der Leidener Flasche nur in geringem Abstande aufeinander einwirken, lassen sich die Wirkungen des Hertzschen Oscillators auf gröfsere Entfernungen hin verfolgen. Dadurch gelang es Hertz die Art dieser Ausbreitung zu untersuchen und die Geschwindigkeit zu messen, mit der sich diese Wirkungen fortpflanzen. Sie ergab sich gleich der Lichtgeschwindigkeit. Wir werden auf diese wichtigen

Untersuchungen, die Elektricität und Optik in engste Verbindung miteinander gebracht haben, am Schlusse der Optik noch einmal zurückkommen.

283. **Absolute Mafseinheiten.** Das von Gaufs und Weber aufgestellte absolute Mafssystem wird so genannt, weil es alle physikalischen Gröfsen auf die drei Grundbegriffe der Länge, der Masse und der Zeit zurückführt. Gaufs und Weber wählten als Einheiten der Länge und der Masse Millimeter und Milligramm; später jedoch hat man, um unbequem grofse Zahlen zu vermeiden, nach dem Beispiel der British Association Centimeter und Gramm angenommen. Die Grundeinheiten des absoluten Mafssystems sind demnach für die Länge das Centimeter (cm), für die Masse die in 1 ccm Wasser von $4^0$ C. enthaltene Masse oder das Gramm (g) und für die Zeit die Sekunde (sec), d. i. der 86400. Teil des mittleren Sonnentags.

Bevor wir hieraus die Einheiten der elektrischen und magnetischen Gröfsen ableiten, erinnern wir uns an die absoluten Einheiten der wichtigsten mechanischen Begriffe. Unter der Geschwindigkeit, die ein bewegter Körper in irgend einem Zeitpunkt besitzt, versteht man das Verhältnis des Weges, den er im nächsten kleinen Zeitteilchen zurücklegt, zu der Dauer dieses Zeitteilchens, also das Verhältnis einer Länge zu einer Zeit. Die Einheit der Geschwindigkeit ist demnach eine Gröfse, welche durch Division der Längeneinheit cm durch die Zeiteinheit sec erhalten und durch cm:sec oder cm $sec^{-1}$ ausgedrückt wird. Diesen Ausdruck cm $sec^{-1}$, welcher die Art des Zusammenhanges des abgeleiteten Begriffes „Geschwindigkeit" mit den Grundeinheiten darstellt, nennt man die „Dimension" (das Ausmafs) jenes Begriffes, und es mufs zu jeder Wertangabe in absolutem Mafse die entsprechende Dimensionsangabe hinzugefügt oder hinzugedacht werden, um die Natur der abgeleiteten Einheit, auf welche sich der Zahlenwert bezieht, zweifellos zu bezeichnen. Beschleunigung nennt man das Verhältnis der Geschwindigkeitszunahme eines bewegten Körpers zu dem kleinen Zeitteilchen, innerhalb dessen diese Zunahme erfolgt, oder, da eine Geschwindigkeitszunahme selbst eine Geschwindigkeit ist, das Verhältnis einer Geschwindigkeit zu einer Zeit. Die Dimension einer Beschleunigung ist demnach cm $sec^{-1}$:sec oder cm $sec^{-2}$. Da man unter Kraft das Produkt der bewegten Masse mit ihrer Beschleunigung versteht, so ist cm g $sec^{-2}$ die Dimension der Krafteinheit oder Dyne, welche, auf die Masse eines Grammes eine sec lang wirkend, derselben die Beschleunigung 1 erteilt. Das Produkt einer Kraft mit der Weglänge, durch welche sie eine Masse bewegt, stellt die Arbeit der Kraft vor; die Arbeitseinheit oder das Erg hat demnach die Dimension $cm^2$ g $sec^{-2}$, und ist diejenige Arbeit, welche von einer Dyne geleistet wird, wenn sie einen Körper um 1 cm verschiebt. Die Bewegungsenergie oder Wucht (das halbe Produkt aus der Masse des bewegten Körpers mit dem Quadrat seiner Geschwindigkeit) hat als Arbeitsgröfse dieselbe Dimension, ebenso eine Wärmemenge, da sie einer bestimmten Arbeit äquivalent ist. Effekt oder Leistung nennt man die von einer Kraft in einer sec geleistete Arbeit; die Einheit des Effekts ist das „Erg pro Sekunde" mit der Dimension $cm^2$ g $sec^{-3}$.

Da uns das Wesen der Elektricität und des Magnetismus unbekannt ist, so mufs man, um die elektrischen und magnetischen Begriffe in absolutem Mafse auszudrücken, auf die bekannten Wirkungen zurückgehen und diese Begriffe so festsetzen, dafs die ausgeübten Kräfte und geleisteten Arbeiten mit den bereits definirten mechanischen Begriffen von Kraft und Arbeit sich decken, was der Fall ist, wenn sie nach cm, g und sec von denselben Dimensionen sind wie diese. Je nachdem man nun von den Wirkungen elektrischer Ladungen aufeinander (den elektrostatischen Wirkungen) oder von den magnetischen Wirkungen des elektrischen Stromes (den elektromagnetischen Wirkungen) ausgeht, gelangt man zu zwei verschiedenen absoluten Mafssystemen, dem elektrostatischen und dem elektromagnetischen System, welche wissenschaftlich

gleichberechtigt sind, von denen jedoch das letztere von gröfserer praktischer Bedeutung ist, und daher zunächst betrachtet werden soll.

Nach dem Coulombschen Gesetz wirken zwei Magnetpole mit einer Kraft aufeinander, welche dem Produkte ihrer Polstärken direkt und dem Quadrat ihrer Entfernung umgekehrt proportional ist. Verstehen wir unter der Einheit der Polstärke ($m$) diejenige, welche auf einen gleichstarken Pol in der Entfernung von 1 cm die Kraft 1 (Dyne) ausübt (144), so mufs die Kraft $m^2 : \text{cm}^2$ gleich der Krafteinheit $\text{cm g sec}^{-2}$ (Dyne) sein. Damit dies möglich sei, müssen wir dem $m^2$ die Dimension $\text{cm}^3 \text{g sec}^{-2}$ und sonach dem $m$, der Einheit der Polstärke, die Dimension $\sqrt{\text{cm}^3 \text{g sec}^{-2}}$ oder $\text{cm}^{3/2} \text{g}^{1/2} \text{sec}^{-1}$ zuschreiben. Magnetisches Moment oder Stabmagnetismus ist das Produkt des Abstandes der beiden Pole eines Magnets mit seiner Polstärke; die Einheit des Moments wird demnach erhalten, wenn man die Einheit der Polstärke mit der Längeneinheit cm multiplizirt, und erhält somit die Dimension $\text{cm}^{5/2} \text{g}^{1/2} \text{sec}^{-1}$. Jedem Punkte eines Magnetfeldes kommt eine bestimmte magnetische Intensität oder Feldstärke zu, vermöge welcher auf einen daselbst befindlichen Magnetpol eine Kraft ausgeübt wird, die gleich ist dem Produkt der Feldstärke mit der Polstärke. Damit dieses Produkt die Dimension einer Kraft ($\text{cm g sec}^{-2}$) erlange, mufs, da $\text{cm}^{3/2} \text{g}^{1/2} \text{sec}^{-1}$ die Einheit der Polstärke ist, die Einheit der Feldstärke die Dimension $\text{cm}^{-1/2} \text{g}^{1/2} \text{sec}^{-1}$ haben. Die Intensität des Erdmagnetismus an irgend einem Orte der Erde ist von dieser Dimension.

Die Wirkung eines vom elektrischen Strom umflossenen kreisförmigen Leiters auf einen Magnetpol kann ersetzt werden durch die Wirkung eines Magnetstabes, dessen Moment gleich ist dem Produkt der Stromstärke mit dem Inhalt der umströmten Fläche. Die Stromstärke ist also eine Gröfse, welche mit einer Fläche, d. i. dem Quadrat einer Länge, multiplizirt, dieselbe Dimension gewinnt wie ein magnetisches Moment, nämlich $\text{cm}^{5/2} \text{g}^{1/2} \text{sec}^{-1}$; ihre Dimension ist daher $\text{cm}^{5/2} \text{g}^{1/2} \text{sec}^{-1} : \text{cm}^2$ oder $\text{cm}^{1/2} \text{g}^{1/2} \text{sec}^{-1}$. Diese Einheit der Stromstärke $\text{cm}^{1/2} \text{g}^{1/2} \text{sec}^{-1}$ besitzt ein elektrischer Strom, welcher einen Kreisbogen vom Radius 1 cm und der Länge 1 cm durchfliefsend auf einen im Mittelpunkt des Kreises befindlichen Magnetpol von der Stärke 1 die Kraft 1 Dyne ausübt. — Die Elektricitätsmenge, welche einen Leiter innerhalb einer gewissen Zeit durchströmt, ist gleich dem Produkte dieser Zeit mit der Stromstärke; die Einheit der Elektricitätsmenge ist daher diejenige Menge, welche ein Strom von der Stärke 1 in 1 sec liefert und ihre Dimension ist $\text{cm}^{1/2} \text{g}^{1/2} \text{sec}^{-1} \times \text{sec}$ oder $\text{cm}^{1/2} \text{g}^{1/2}$. — Der Wärmeeffekt, welchen ein elektrischer Strom hervorbringt, ist nach dem Jouleschen Gesetz dem Quadrat der Stromstärke und dem Widerstand des Leiters proportional; die Einheit des Widerstandes mufs daher, damit ihr Produkt mit dem Quadrat der Stromstärke ($\text{cm g sec}^{-2}$) der Dimension eines Wärmeeffekts ($\text{cm}^2 \text{g sec}^{-3}$) gleichkomme, die Dimension $\text{cm sec}^{-1}$, d. h. diejenige einer Geschwindigkeit, besitzen; die Einheit des Widerstandes kommt demnach einem Leiter zu, in welchem ein Strom von der Stärke 1 in 1 sec eine der Arbeitseinheit (Erg) äquivalente Wärmemenge entwickelt. — Dem Ohmschen Gesetz gemäfs, welches fordert, dafs die elektromotorische Kraft (Potentialunterschied, Spannung) dem Produkt aus Stromstärke und Widerstaud des Leiters gleich sei, mufs die Einheit der elektromotorischen Kraft oder des elektrischen Potentials von der Dimension $\text{cm}^{3/2} \text{g}^{1/2} \text{sec}^{-2}$ sein; sie ist hiermit derart festgesetzt, dafs sie in einem Leiter, dessen Widerstand 1 ist, einen elektrischen Strom von der Stärke 1 und eine der Wärmeeinheit äquivalente Wärmemenge erzeugt. — Unter Kapacität eines Leiters versteht man das Verhältnis der auf ihm vorhandenen Elektricitätsmenge zu der hierdurch erreichten elektrischen Spannung; die Einheit der Kapacität hat daher die Dimension $\text{cm}^{1/2} \text{g}^{1/2} : \text{cm}^{3/2} \text{g}^{1/2} \text{sec}^{-2}$ oder $\text{cm}^{-1} \text{sec}^2$; sie ist einem Leiter (oder einem Kondensator) eigen, welcher durch die Einheit der Elektricitätsmenge bis zur Einheit des Potentials geladen wird.

Die Dimensionen der hiermit definirten Einheiten sind in der folgenden kleinen Tabelle zusammengestellt.

Einheiten des absoluten elektromagnetischen Maſssystems:

| | | Dimension |
|---|---|---|
| $m$ | Polstärke . . . . . . . . . . | $cm^{3/2}\ g^{1/2}\ sec^{-1}$ |
| $M$ | Magnetisches Moment . . . . | $cm^{5/2}\ g^{1/2}\ sec^{-1}$ |
| $T$ | Feldstärke. . . . . . . . . . | $cm^{-1/2}\ g^{1/2}\ sec^{-1}$ |
| $E$ | Elektricitätsmenge . . . . . . | $cm^{1/2}\ g^{1/2}$ |
| $J$ | Stromstärke . . . . . . . . . | $cm^{1/2}\ g^{1/2}\ sec^{-1}$ |
| $R$ | Widerstand . . . . . . . . . | $cm\ sec^{-1}$ |
| $V$ | Elektromotorische Kraft (Potential) | $cm^{3/2}\ g^{1/2}\ sec^{-2}$ |
| $C$ | Kapacität . . . . . . . . . . | $cm^{-1}\ sec^2$ |

Diese auf cm, g und sec bezogenen absoluten elektromagnetischen Einheiten führen noch immer, obgleich in minderem Grade als die auf mm, mg und sec bezogenen von Gauſs und Weber, für die in der Praxis vorkommenden elektrischen und magnetischen Gröſsen auf unbequem groſse Zahlenwerte. Der Widerstand einer Siemens-Einheit (224) z. B. beziffert 940700000 absolute Widerstandseinheiten oder $9407 \cdot 10^5\ cm\ sec^{-1}$, die elektromotorische Kraft eines Daniellschen Elements 110000000 absolute Einheiten oder $1100 \cdot 10^5 \cdot cm^{3/2}\ g^{1/2}\ sec^{-2}$. Die British Association und nach ihr der Pariser elektrische Kongreſs (1881) haben daher angemessene decimale Vielfache oder Bruchteile der absoluten Einheiten als praktische Einheiten festgesetzt und diesen die Namen berühmter Physiker, welche sich um die Elektricitätslehre verdient gemacht haben, beigelegt. Ein Widerstand von 1000 Millionen absoluten Widerstandseinheiten, also von der Gröſse $10^9\ cm\ sec^{-1}$, welcher nur um wenige Prozente von der Siemensschen Einheit abweicht, wurde als höhere Widerstandseinheit festgesetzt und Ohm genannt. Der 100millionenfache Wert der absoluten Einheit der elektromotorischen Kraft, welcher sich von 1 Daniell nur wenig unterscheidet, bildet unter dem Namen Volt die praktische Einheit der elektromotorischen Kraft, so daſs 1 Volt $10^8\ cm^{3/2}\ g^{1/2}\ sec^{-2}$ ist. Die Stärke des Stromes, welche die elektromotorische Kraft 1 Volt in einem Stromkreis vom Widerstand 1 Ohm hervorbringt, nennt man Ampère; 1 Ampère ist der zehnte Teil der absoluten Stromstärkeeinheit oder $10^{-1}\ cm^{1/2}\ g^{1/2}\ sec^{-1}$. Coulomb (211) heiſst die Elektricitätsmenge, die den Querschnitt eines Drahtes bei der Stromstärke 1 Ampère in 1 sec durchflieſst, und beträgt ein Zehntel der absoluten Elektricitätseinheit oder $10^{-1}\ cm^{1/2}\ g^{1/2}$. Man nennt endlich Farad die Kapacität eines Leiters, welcher unter dem Einfluſs der elektromotorischen Kraft 1 Volt die Elektricitätsmenge 1 Coulomb aufnimmt; 1 Farad ist der 1000millionste Teil der absoluten Kapacitätseinheit oder $10^{-9}\ cm^{-1}\ sec^2$. Diese praktischen Einheiten des elektromagnetischen Maſssystems sind in der folgenden kleinen Tabelle mit Angabe ihrer absoluten Werte zusammengestellt:

| Einheit | Name | Wert in absoluten Einheiten |
|---|---|---|
| der Elektricitätsmenge | Coulomb | $10^{-1}\ cm^{1/2}\ g^{1/2}$ |
| der Stromstärke | Ampère | $10^{-1}\ cm^{1/2}\ g^{1/2}\ sec^{-1}$ |
| des Widerstandes | Ohm | $10^9\ cm\ sec^{-1}$ |
| der elektromotorischen Kraft | Volt | $10^8\ cm^{3/2}\ g^{1/2}\ sec^2$ |
| der Kapacität | Farad | $10^{-9}\ cm^{-1}\ sec^2$ |

Als Einheit des Widerstandsmaſses oder „Ohm“ ist in Deutschland durch Reichsgesetz vom 1. Juni 1898 der Widerstand einer 106,3 cm langen Quecksilbersäule von 1 qmm Querschnitt bei 0° eingeführt worden, ebenso in den meisten anderen Ländern (internationales Ohm). Das legale Volt wurde als die elektromotorische Kraft angenommen, welche in einem Stromkreis vom Widerstand 1 Ohm die Einheit der Stromstärke, also 1 Ampère erzeugt. Was die Festsetzung dieser letzteren Einheit betrifft, so wurde dieselbe auf die oben gegebene wissenschaftliche Definition beschränkt, weil die direkte Bestimmung ihres theoretischen Wertes leichter erscheint als ihre Herleitung aus den Begriffen Ohm und Volt.

Das absolute elektrostatische Mafssystem gründet seine Definition der Elektricitätsmenge auf die Wirkung elektrischer Ladungen aufeinander. Nehmen wir als elektrostatische Einheit der Elektricitätsmenge ($E'$) diejenige an, welche auf die ihr gleiche Menge in der Entfernung 1 cm die Kraft 1 (Dyne) ausübt (162), so mufs nach dem Coulombschen Gesetz $E'^2 : \text{cm}^2$ gleich dieser Krafteinheit $\text{cm g sec}^{-2}$, oder es mufs $E'^2 = \text{cm}^3 \text{ g sec}^{-2}$ sein; die Einheit der Elektricitätsmenge hat also in diesem System die Dimension $\text{cm}^{3/2} \text{ g}^{1/2} \text{ sec}^{-1}$. Da man unter Stromstärke ($J'$) auch hier die in der Zeiteinheit durch einen Leiter fliefsende Elektricitätsmenge versteht, so ist die Einheit der Stromstärke $E' : \text{sec}$ oder $\text{cm}^{3/2} \text{ g}^{1/2} \text{ sec}^{-2}$. Die Einheit der elektrischen Kapacität $C'$ ist gleich der Längeneinheit cm, denn wir wissen ja, dafs in diesem Mafssystem die Kapacität einer Kugel gleich ihrem Radius ist (169); und da die Elektricitätsmenge auf einem Leiter gleich dem Produkte aus seiner Kapacität und seinem Potential ist ($E' = C' V'$), so mufs die Einheit des elektrostatischen Potentials von der Dimension $V' = E' : C'$ oder $\text{cm}^{1/2} \text{ g}^{1/2} \text{ sec}^{-1}$. Nach dem Ohmenschen Gesetz ist der Widerstand $R' = V' : J'$; demnach kommt der Einheit des Widerstandes die Dimension $\text{cm}^{1/2} \text{ g}^{1/2} \text{ sec}^{-1} : \text{cm}^{3/2} \text{ g}^{1/2} \text{ sec}^{-2}$ oder $\text{cm}^{-1} \text{ sec}$ zu. Wir haben demnach zusammengestellt folgende Einheiten des absoluten elektrostatischen Mafssystens:

| | | |
|---|---|---|
| $E'$ | Elektricitätsmenge . . . . | $\text{cm}^{3/2} \text{ g}^{1/2} \text{ sec}^{-1}$ |
| $J'$ | Stromstärke. . . . . . . . | $\text{cm}^{3/2} \text{ g}^{1/2} \text{ sec}^{-2}$ |
| $R'$ | Widerstand . . . , . . . | $\text{cm}^{-1} \text{ sec}$ |
| $V'$ | Potential. . . . . . . . | $\text{cm}^{1/2} \text{ g}^{1/2} \text{ sec}^{-1}$ |
| $C'$ | Kapacität . . . . . . . . | cm |

Dieselben Gröfsen werden also im elektrostatischen System nach Einheiten von anderen Dimensionen gemessen als im elektromagnetischen System. Die Verhältnisse der Mafszahlen für die gleichnamigen Gröfsen in beiden Systemen sind daher nicht unbenannte Zahlen, sondern haben folgende Dimensionen:

$$\frac{E'}{E} = \text{cm sec}^{-1}, \quad \frac{J'}{J} = \text{cm sec}^{-1}, \quad \frac{R'}{R} = \text{cm}^{-2} \text{ sec}^2, \quad \frac{V'}{V} = \text{cm}^{-1} \text{ sec},$$

$$\frac{C'}{C} = \text{cm}^2 \text{ sec}^{-2}.$$

Wie man sieht, sind diese Verhältnisse sämtlich durch eine Gröfse von der Dimension $\text{cm sec}^{-1}$, also durch eine Geschwindigkeit, ausdrückbar. Diese Gröfse wurde bestimmt durch Vergleichung von nach elektrostatischem und elektromagnetischem Mafse gemessenen Elektricitätsmengen (W. Weber und R. Kohlrausch), Potentialen (W. Thomson, Maxwell) und Kapacitäten (Ayrton, Perry, J. Thomson) und wurde gefunden $= 3 \cdot 10^{10} \text{ cm sec}^{-1}$ oder 300 000 km $\text{sec}^{-1}$, also gleich der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts. Die elektromagnetische Einheit der Elektricitätsmenge enthält also 30 000 Millionen elektrostatische Einheiten, und ein Strom von 1 Ampère Stärke führt in der Sekunde 3000 Millionen solcher Einheiten durch jeden Querschnitt des Leiters.

---

# IX. Wellen und Schall.

## A. Wellenbewegung.

284. **Wellenbewegung.** Eine Wellenbewegung entsteht, wenn sich längs einer Reihe von Punkten oder in irgend einem Mittel eine schwingende Bewegung mit gleichförmiger Geschwindigkeit fortpflanzt, wobei jedes in der Fortpflanzungsrichtung folgende Teilchen, entsprechend seinem Abstand von dem zuerst in Bewegung gesetzten Teilchen, seine Schwingung etwas später beginnt als das vorhergehende. Ein anschauliches Bild von den Vorgängen bei der Wellenbewegung bietet ein wogendes Ährenfeld. Jede Ähre wird von dem Wind hinabgebogen, richtet sich aber vermöge der Elasticität des Halmes wieder empor, biegt sich wieder hinab u. s. w. und vollführt in dieser Weise regelmäfsig sich wiederholende Schwingungen. Die folgenden Ähren werden durch den Windstofs, der die erste zu schwingen zwang, um so später in Schwingungen versetzt, je weiter

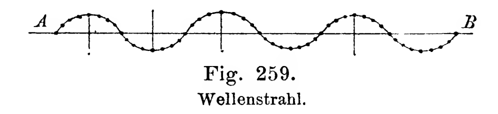



Fig. 259.
Wellenstrahl.

sie in der Reihe der Ähren von der ersten entfernt sind. Vermöge der regelmäfsigen Aufeinanderfolge von niedergebogenen und wieder aufgerichteten Ährenreihen zeigt die Oberfläche des Feldes in jedem Augenblick die Formen von abwechselnden Vertiefungen und Erhöhungen; diese Wellenform sehen wir mit der Geschwindigkeit des Windes das Feld entlang eilen, während jede Ähre, an ihrem Ort festgewurzelt, nur in beschränktem Bereiche hin und her schwingt.

Durch Wellenmaschinen kann man die Wellenbewegung in anschaulicher Weise nachahmen. Bei der Machschen Wellenmaschine sind eine Reihe von Pendelkugeln längs einem Gestelle an je zwei Fäden so aufgehängt, dafs jede nur senkrecht zu dieser Längsrichtung schwingen kann. Schiebt man alle Kugeln mittels einer Holzleiste gleichweit aus der Vertikalebene seitwärts heraus, und zieht die Leiste in der Längsrichtung (*AB* Fig. 259) mit gleichförmiger Geschwindigkeit weg, so wird eine Kugel nach der anderen losgelassen, und indem jede senkrecht zu *AB* hin- und herschwingt, bietet ihre Gesamtheit von oben gesehen in irgend einem Moment den Anblick der Fig. 259, mit Ausbiegungen nach der einen und der

anderen Seite, welche längs der Reihe der Kugeln gleichmäſsig fortschreiten.

Bei dem wogenden Ährenfeld und bei der Pendelreihe ist es ein äuſserer Anlaſs, welcher die Bewegung von jedem Teilchen auf das folgende überträgt. In einem Mittel, dessen Teilchen durch zwischen ihnen thätige Kräfte in Wechselwirkung stehen, wird die Übertragung durch diese Kräfte selbst vermittelt. Ein Beispiel hierfür bieten die durch die Schwerkraft fortgepflanzten Flüssigkeitswellen.

Wirft man einen Stein in ein ruhig stehendes Gewässer, so wird das an dieser Stelle hinabgedrückte Wasser durch den Druck des umgebenden Wassers wieder emporzusteigen genötigt, kommt aber, nachdem es den ursprünglichen Wasserspiegel erreicht hat, hier nicht plötzlich zur Ruhe, sondern setzt seine Bewegung nach aufwärts fort, bis die entgegenwirkende Schwerkraft es wieder zum Herabsinken zwingt; so vollführt das durch den Stein zuerst aus seiner Ruhelage gebrachte Wasserteilchen eine Reihe auf- und abwärtsgehender Schwingungen. Es kann aber das Gleichgewicht des Wasserspiegels nicht an einer Stelle gestört werden, ohne daſs sich die Störung wegen der allseitigen Fortpflanzung des Wasserdrucks auch auf die ringsum benachbarten Wasserteilchen überträgt und diese veranlaſst, in gleichem Takt wie das zuerst gestörte Teilchen auf und ab zu schwingen, wobei jedes weiter entfernte Teilchen seine schwingende Bewegung etwas später beginnt als das ihm unmittelbar vorhergehende. Jede Hebung des zuerst gestörten Teilchens gibt zu einer Senkung der rings benachbarten Teilchen Anlaſs, welche, indem sie nach allen Richtungen fortschreitet, eine ringförmige Vertiefung um den Erregungsmittelpunkt erzeugt; die darauf folgende Senkung veranlaſst ebenso ringsum eine wallartige Erhebung, welche als Wellenberg dem vorausgegangenen Wellenthal auf dem Fuſse folgt. Während also das zuerst erregte Teilchen eine ganze aus Hebung und Senkung bestehende Schwingung vollendet, erzeugt es eine vollständige aus Wellenberg und Wellenthal gebildete Welle, und indem es fortfährt zu schwingen, scheinen aus ihm immer neue Wellenringe hervorzuwachsen, welche, sich erweiternd, mit gleichförmiger Geschwindigkeit nach auſsen hin fortschreiten. Es ist aber nur die Gestalt der Wasserfläche, welche fortschreitet, nicht das Wasser selbst; die Wasserteilchen verlassen dabei ebensowenig ihren Ort wie die Halme eines wogenden Ährenfeldes, sondern schwanken nur auf und ab, wie man an einem auf dem Wasser schwimmenden kleinen Holzstückchen, das diese schwingende Bewegung mitmacht, leicht beobachten kann. Die Gesamtheit aller von demselben Erregungspunkt ausgehenden Wellenringe bildet ein Wellensystem. Jede vom Mittelpunkt des Wellensystems auf der wagrecht gedachten Wasserfläche gezogene Gerade heiſst ein Wellenstrahl. Alle Wasserteilchen, welche im Ruhezustand auf dieser Geraden lagen, befinden sich während der Wellenbewegung teils

darüber, teils darunter, je nachdem sie augenblicklich einem Wellenberg oder einem Wellenthal angehören, und bilden daher in ihrer Aufeinanderfolge eine auf und ab gewundene Wellenlinie. Eine Strecke auf dem Strahl, welche von einer vollständigen Welle, nämlich einem Wellenberg und einem Wellenthal, eingenommen wird, nennt man eine Wellenlänge.

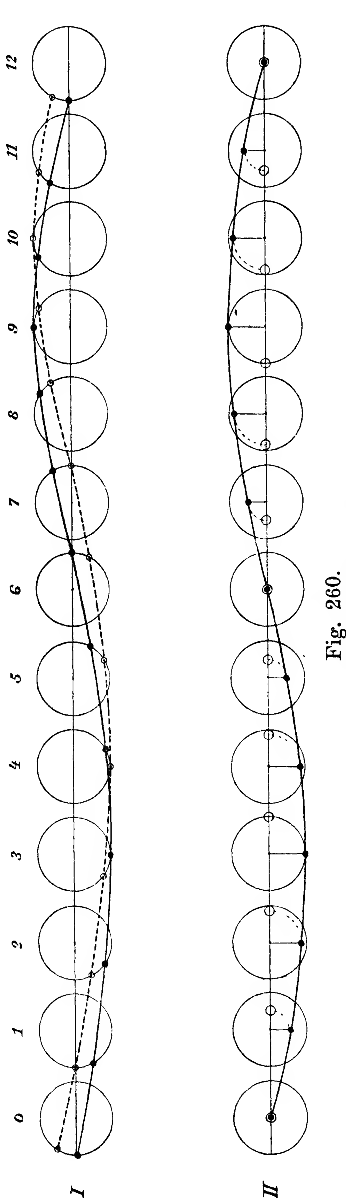


Fig. 260.
Entstehung fortschreitender Wellen.

Zur Beobachtung der Bewegung der Wasserteilchen während der Fortpflanzung einer Welle bedienten sich die Brüder E. H. und W. Weber (1825) der Wellenrinne, eines langen, schmalen Troges mit Seitenwänden aus Glasplatten. Dem Wasser wurde ein Pulver von gleichem spezifischem Gewicht (Bernstein) beigemischt, dessen Teilchen die Bewegungen der Wasserteilchen, an welchen sie teilnehmen, sichtbar machen. Es ergab sich, dafs die Wasserteilchen in der durch die Fortpflanzungsrichtung gelegten Vertikalebene krummlinige Bahnen beschreiben, die an der Oberfläche Kreise, nach der Tiefe zu Ellipsen mit immer kleinerem vertikalen Durchmesser sind.

In Fig. 260 *I* mögen die Kreise 0 bis 12 die Bahnen von 13 Wasserteilchen vorstellen, welche im Ruhezustand gleichweit voneinander entfernt im horizontalen Wasserspiegel liegen. Wir betrachten die Lagen sämtlicher Teilchen in dem Augenblick, in welchem das Teilchen bei 0, nachdem es einen ganzen Umlauf vollendet hat und im Niveau wieder angekommen ist, sich gerade anschickt, einen zweiten Umlauf zu beginnen. Hat sich während der Dauer des ersten Umlaufs die Bewegung bis zum Teilchen 12 fortgepflanzt, so ist dieses gerade im Begriff, seinen ersten Umlauf anzutreten, d. h. es ist um einen ganzen Umlauf hinter der Bewegung des Teichens 0 zurück. Das Teilchen 1 ist alsdann, weil

sein Abstand von 0 zwölfmal kleiner ist, auch nur um $^1/_{12}$ Umlauf gegen das Teilchen 0 zurückgeblieben, hat also $^{11}/_{12}$ seines Umlaufs vollendet, und ebenso haben die Teilchen 2, 3, 4 . . . gleichzeitig, beziehungsweise nur $^{10}/_{12}$, $^9/_{12}$, $^8/_{12}$ . . . ihres Umlaufs ausgeführt, und befinden sich augenblicklich in den Stellungen, welche in der Zeichnung durch schwarze Punkte angegeben sind. Wir finden die gleichzeitige Lage auch aller in der Zeichnung nicht angegebenen zwischenliegenden Teilchen, wenn wir diese Punkte durch eine stetige krumme Linie, die Wellenlinie, verbinden. Nach einem Zwölftel der Umlaufszeit wird jeder der Punkte um ein Zwölftel des Kreisumfangs weiter geschritten sein, und sämtliche Punkte liegen jetzt auf der punktirt gezeichneten Wellenlinie, welche sich von der vorigen durch nichts unterscheidet, als dafs sie in der Richtung der Fortpflanzung nach vorwärts verschoben ist.

Man erkennt unmittelbar, dafs während der Umlaufszeit eine ganze aus Wellenthal und Wellenberg bestehende Welle entsteht; die Wellenlänge ist also die Strecke, um welche sich die Bewegung durch die Reihe der Teilchen fortpflanzt, während ein Teilchen einen ganzen Umlauf oder eine ganze Schwingung vollendet. Bezeichnet man mit $\lambda$ die Wellenlänge, mit $V$ die Fortpflanzungsgeschwindigkeit und mit $T$ die Umlaufs- oder Schwingungsdauer, so ist $\lambda = VT$. Ist $n = 1/T$ die Schwingungszahl, d. h. die Anzahl der Umläufe oder Schwingungen in 1 sec, so müssen, da jede Schwingung eine Welle erzeugt, auf die Strecke $V$, um welche sich die Bewegung während 1 sec fortpflanzt, soviele Wellenlängen gehen, als die Schwingungszahl angibt, oder es ist $V = n\lambda$.

Während ein Wasserteilchen seinen Kreis beschreibt, wird es gleichzeitig vertikal auf und ab und horizontal in der Fortpflanzungsrichtung vor und zurück geschoben. Man kann in der That die gleichförmige Bewegung im Kreis, wie schon beim Pendel (40) gezeigt worden ist, als zusammengesetzt ansehen aus zwei zu einander senkrechten geradlinigen pendelartigen Schwingungen von gleicher Dauer. Die ersteren Schwingungen, welche senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung, also senkrecht zum Wellenstrahl erfolgen, nennt man transversale oder Querschwingungen, die letzteren, welche längs der Fortpflanzungsrichtung, also im Strahle selbst, vor sich gehen, longitudinale oder Längsschwingungen, und ebenso bezeichnet man die aus ihnen bestehenden Wellen. Eine Wasserwelle ist also aus einer longitudinalen und aus einer transversalen Welle zusammengesetzt.

Diese einfacheren Wellen können aber auch, bei anderen Arten von Wellenbewegungen, jede für sich allein auftreten. Trägt man von den Gleichgewichtslagen der Teilchen in Fig. 260 *II* aus blofs deren vertikale Verschiebungen nach ab- und aufwärts auf, so erhält man das Bild einer transversalen Welle, und behält man blofs die Verschiebungen in horizontaler Richtung bei, dasjenige einer longitudinalen Welle. Da bei letzterer kein Teilchen aus der Richtung

des Strahles heraustritt, so gibt es bei den longitudinalen Wellen keine Wellenform, keine Berge und Thäler; man bemerkt aber leicht, dafs die in Fig. 260 *II* durch Ringelchen angedeuteten Teilchen von 0 bis 3 und von 9 bis 12 weiter auseinander gerückt, zwischen 3 und 9 enger zusammengeschoben sind als sie es im Ruhezustande waren. Eine longitudinale Welle bringt also in dem Mittel, durch welches sie fortschreitet, abwechselnde Verdichtungen und Verdünnungen hervor, welche in den um eine halbe Wellenlänge voneinander entfernten Punkten 0 und 6 ihre gröfsten Werte erreichen.

Die Machsche Wellenmaschine brachte bei dem obigen Versuch eine transversale Welle zur Anschauung; denn alle Pendelkugeln schwingen senkrecht zu der Linie, welche sie in der Ruhelage einnehmen. Auch die Seilwellen, die man z. B. erhält, wenn man einen langen Kautschukschlauch am einen Ende senkrecht zu seiner Länge mit der Hand in Schwingungen versetzt, sind transversal. — Der Machsche Wellenapparat ist so eingerichtet, dafs man, nachdem die Schwingungen in der dort angegebenen Weise angeregt sind, sämtliche Schwingungsebenen gleichzeitig um einen rechten Winkel drehen kann; die Kugeln schwingen dann alle längs jener Linie, und die vorher transversale Welle verwandelt sich in eine longitudinale mit abwechselnden Verdichtungen und Verdünnungen. In Fig. 260 *II* ist diese Drehung um $90^0$ durch punktirte Kreisbogen angedeutet. Eine wirklich longitudinale Welle, die nicht durch äufsere Veranstaltung, sondern durch elastische Kräfte fortgepflanzt wird, erhält man, wenn man einem langen spiralförmig gewundenen Draht, der an Fäden horizontal aufgehängt ist, am einen Ende einen Stofs in der Längsrichtung erteilt; indem die einzelnen Windungen hin- und herschwingen, sieht man eine Verdichtung und eine Verdünnung die Spirale entlang laufen.

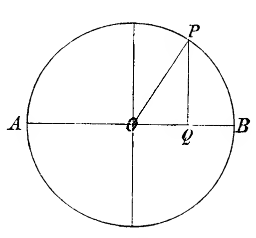


Fig. 261.
Schwingungsgesetz.

Bewegt sich ein Teilchen $P$ gleichförmig in einem Kreise (Fig. 261) vom Radius $a$ und Mittelpunkt $O$, und hat es von $A$ aus nach der Zeit $t$ den dem Winkel $\alpha$ entsprechenden Bogen $AP$ zurückgelegt, so ist seine Verschiebung senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung $AB$ die von $P$ auf $AOB$ gefällte Senkrechte $PQ = y = a \sin \alpha$. Nun hat man aber, wenn $T$ die Umlaufszeit oder Schwingungsdauer bezeichnet, $\alpha : 360^0 = t : T$, woraus folgt $\alpha = 360\, t/T$. Die Verschiebung oder Ausweichung (Exkursion) nach der Zeit $t$ beträgt also $y = a \sin 360 \frac{t}{T}$, oder wenn man die Winkel statt in Graden durch Bogenlängen ausdrückt:

$$y = a \sin 2\pi \frac{t}{T}.$$

Die gröfste Ausweichung $a$, welche für $t = {}^1/_4 T,\ {}^3/_4 T,\ {}^5/_4 T \ldots$ eintritt, nennt man Schwingungsweite oder Amplitude, den durch $2\pi t/T$ aus-

gedrückten augenblicklichen Bewegungszustand die Phase, und $t$ die zugehörige Phasenzeit. Ist ein Teilchen in der Richtung des Strahles von dem soeben betrachteten Teilchen um die Strecke $x$ entfernt, so ist seine Phasenzeit $t-\tau$, wenn $\tau$ die Zeit ist, in welcher sich die schwingende Bewegung um $x$ fortpflanzt. Da die Bewegung durch die Reihe der Teilchen während einer Schwingungsdauer $T$ um die Wellenlänge $\lambda$ fortschreitet, so mufs sich $\tau:T=x:\lambda$ verhalten, woraus sich $\tau/T=x/\lambda$ ergibt, und die Ausweichung an der durch $x$ gegebenen Stelle des Strahles ist

$$y=a\sin 2\pi\left(\frac{t}{T}-\frac{x}{\lambda}\right).$$

Diese Gleichung gibt für jeden bestimmten Wert von $x$ die im Laufe der Zeit erfolgenden Ausweichungen des daselbst liegenden Teilchens an, und für jeden bestimmten Wert von $t$ die in diesem Augenblick stattfindende Lage aller längs des Strahles aufeinander folgenden Teilchen, also die Gestalt der transversalen Welle (Sinusoide) an; man nennt sie daher geradezu die Gleichung eines Wellenstrahles. Sie gilt übrigens ebensogut für eine longitudinale Welle, da diese aus der transversalen durch blofse Drehung der Schwingungsrichtung um $90^0$ ohne Änderung der Ausweichung hervorgeht (vgl. Fig. 261 *II*). Die Ausweichung $y$ ist sowohl in Bezug auf $t$ als in Bezug auf $x$ periodisch; läfst man bei unverändertem $x$ die Zeit $t$ um $T$, oder bei unverändertem $t$ die Strecke $x$ um $\lambda$ zunehmen, so durchläuft $y$ die ganze Periode seiner zwischen $-a$ und $+a$ liegenden Werte.

Betrachten wir die beiden Teilchen, welche augenblicklich die Gipfel zweier aufeinander folgender Wellenberge einnehmen, so finden wir beide gerade im Begriff, aus dieser ihrer höchsten Lage nach abwärts zu gehen; diese beiden Teilchen, welche offenbar um eine Wellenlänge voneinander abstehen; befinden sich also in dem nämlichen Schwingungszustand (in der nämlichen Phase). Dasselbe gilt überhaupt von je zwei Teilchen, welche um eine oder mehrere ganze Wellenlängen von einander entfernt sind; ihre Bewegungen erfolgen in völliger Übereinstimmung. Nehmen wir dagegen zwei Teilchen, welche um eine halbe Wellenlänge voneinander abstehen, von denen z. B. das eine auf dem Gipfel eines Wellenberges, das andere in der Tiefe des benachbarten Wellenthales liegt, so sind dieselben in gerade entgegengesetzten Schwingungszuständen. Während nämlich jenes aus seiner höchsten Lage nach abwärts zu gehen beginnt, ist dieses im Begriff, aus seiner tiefsten Lage nach aufwärts zu gehen. Überhaupt sieht man ein, dafs die Bewegungen zweier Teilchen, deren Abstand voneinander eine halbe Wellenlänge oder ein ungerades Vielfaches einer halben Wellenlänge beträgt, zu einander in vollkommenem Gegensatz stehen.

285. **Interferenz.** Wirft man zwei Steine in einiger Entfernung voneinander in ruhiges Wasser, so entstehen zwei gleiche Wellensysteme, welche bei ihrer weiteren Ausbreitung sich durchkreuzen; wo dies geschieht, sehen wir die Oberfläche von einem zierlichen Netzwerk kleiner Erhöhungen und Vertiefungen bedeckt, welche durch das Zusammenwirken oder durch die Interferenz der beiden Wellensysteme entstehen. An allen Stellen nämlich, wo zwei Wellenberge zusammentreffen, erhebt sich das Wasser zu doppelter Höhe, und wo zwei Wellenthäler sich durchkreuzen, senkt es sich

zu doppelter Tiefe. An jenen Stellen dagegen, wo ein Wellenberg mit einem Wellenthal zusammentrifft, wird das Wasser auf seine ursprüngliche Höhe, die es im Ruhezustand einnimmt, zurückgeführt, d. h. hier heben sich die beiden Wellenbewegungen gegenseitig auf. Überhaupt erleidet in einem Mittel, welches von zwei oder beliebig vielen gleichen oder ungleichen Wellensystemen mit kleinen Ausweichungen bewegt wird, jedes Teilchen eine Verschiebung, welche die Summe ist aus allen ihm durch die einzelnen Wellensysteme in dem nämlichen Augenblick mitgeteilten Verschiebungen. Um diese Summe zu bilden, mufs man alle Hebungen zusammenzählen, alle Senkungen abziehen; die wirklich stattfindende Bewegung des Teilchens ist sozusagen die Bilanz aus allen auf dasselbe einwirkenden Teilbewegungen. Man nennt diesen Satz das Prinzip der Übereinanderlagerung (Superposition) der Schwingungen, weil es in der That nichts anderes aussagt, als dafs jedes Wellensystem sich genau so über eine bereits von Wellen bewegte Oberfläche legt,

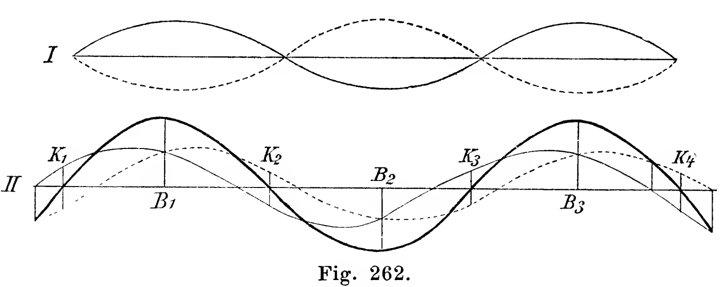



Fig. 262.
Interferenz entgegenkommender Wellen.

wie es sich, wenn es allein vorhanden wäre, über die ruhende Oberfläche gelegt haben würde. Jedes Wellensystem bildet sich aus, als ob die anderen gar nicht vorhanden wären, behauptet sein besonderes Dasein im Durcheinanderwogen mit den anderen und schreitet, nachdem es diese durchkreuzt und mit ihnen zusammengewirkt (interferirt) hat, auf der noch ruhigen Wasserfläche weiter, als ob es nie eine Störung erlitten hätte. Wir sehen z. B. die von den fallenden Regentropfen erregten zarten Wellenringe auf den grofsen durch ein Dampfboot aufgewühlten Wogen ebensogut zu stande kommen wie im ruhigen See; wir sehen, wie diese Wogen, wenn sie eine vom Wind gekräuselte Stelle durchsetzen, die kleinen Kräuselwellen auf ihren Rücken nehmen, jenseits aber, die gekräuselte Fläche gleichsam unberührt zurücklassend, in ihrer ursprünglichen Gestalt weiterschreiten.

286. **Stehende Wellen.** Besonders bemerkenswert ist die Interferenz zweier Wellen von gleicher Wellenlänge und Schwingungsweite, welche sich in entgegengesetzter Richtung fortpflanzen. Haben die beiden Wellen in einem Augenblick die Lage Fig. 262 *I*, so

dafs durchweg Wellenberg und Wellenthal zusammenfallen, so sind die Verschiebungen überall gleich und entgegengesetzt und sämtliche Teilchen befinden sich momentan in der Gleichgewichtslage. Gelangen nun die beiden Wellen, die schwach ausgezogene und die punktirte, indem sie in entgegengesetztem Sinne fortschreiten, z. B. in die Lage Fig. 262 *II*, so entsteht aus ihrem Zusammenwirken die stark ausgezogene Welle von gleicher Länge und Schwingungsdauer. In den Durchschnittspunkten bei $B_1$, $B_2$, $B_3$, . . ., zu welchen die zwei Wellen bei ihrem Gegenlaufe stets symmetrisch bleiben, sind

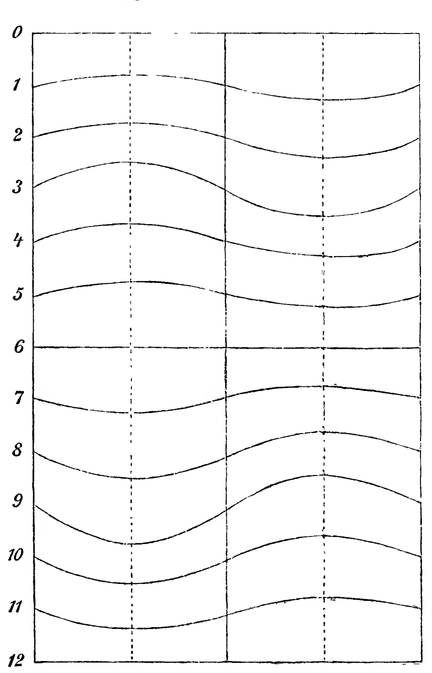



Fig. 263.
Stehende Wellen.

die Verschiebungen gleich und gleichgerichtet, und summiren sich; an diesen Stellen, welche je um eine halbe Wellenlänge voneinander abstehen, sind also die Teilchen um den doppelten Betrag abwechselnd nach oben und nach unten verschoben. In den Punkten $K_1$, $K_2$, $K_3$ . . . dagegen, welche zwischen den Punkten $B_1$, $B_2$, $B_3$ . . . gerade in der Mitte liegen, also gleichfalls unter sich je um eine halbe Wellenlänge abstehen, sind die Verschiebungen gleich und entgegengesetzt und heben sich auf. Schreiten die beiden Wellen gegeneinander weiter fort, so erkennt man, dafs in den Punkten $K_1$, $K_2$, $K_3$ . . . die Verschiebungen immer gleich und entgegengesetzt, in den Punkten $B_1$, $B_2$, $B_3$ . . . gleich und gleichgerichtet

bleiben; die Teilchen $K_1$, $K_2$, $K_3$ ... verharren also in ihren Gleichgewichtslagen immer in Ruhe, während die Teilchen $B_1$, $B_2$, $B_3$ ... lebhaft abwechselnd auf- uud abwärts schwingen, und ihre gröfsten Ausweichungen erlangen, wenn die beiden Wellen von der Lage *I* aus jede um eine Viertelwellenlänge fortgeschritten sind, so dafs jetzt überall Wellenberg mit Wellenberg und Wellenthal mit Wellenthal zusammenfällt. Die Gestalten, welche die resultirende Welle im Laufe einer ganzen Schwingungsdauer nach und nach annimmt, sind in Fig. 263 je nach $^1/_{12}$ Schwingungsdauer angegeben. Es ist ersichtlich, dafs alle Teilchen gleichzeitig durch ihre Gleichgewichtslagen (bei 0, 6 und 12) hindurchgehen, gleichzeitig ihre gröfsten Ausweichungen (bei 3 und 9) erreichen, und sich stets gleichzeitig in demselben Schwingungszustande befinden, wobei nur die Schwingungsweite von Stelle zu Stelle periodisch sich ändert. Die Form der Welle schreitet also nicht fort, weshalb man solche Wellen stehende nennt im Gegensatz zu den bisher betrachteten fortschreitenden Wellen, bei welchen jedes in der Fortpflanzungsrichtung folgende Teilchen später als das vorhergehende durch die Gleichgewichtslage geht. Die Punkte $K_1$, $K_2$, $K_3$ ..., welche immer in Ruhe bleiben, heifsen Knoten, die Punkte $B_1$, $B_2$, $B_3$ ..., in welchen die lebhafteste Hin- und Herbewegung stattfindet, Bäuche.

Stehende Transversalwellen lassen sich leicht mittels eines Seiles oder eines langen schwach gespannten Kautschukschlauches hervorrufen. Ist der Schlauch am einen Ende festgeklemmt, und erteilt man dem anderen Ende durch einen plötzlichen Ruck mit der Hand eine Ausbiegung nach aufwärts, so sieht man diese als Wellenberg den Schlauch entlang laufen und von dort als Ausbiegung nach unten oder als Wellenthal wieder zurückkehren. Die Welle wird also am festen Ende mit entgegengesetzter Schwingungsrichtung zurückgeworfen oder reflektirt. Ist dieses zweite Ende beweglich, wie bei einem frei herabhängenden oder an einen langen dünnen Faden geknüpften Schlauch, so kehrt der Wellenberg als Wellenberg zurück; am freien Ende erfolgt also die Zurückwerfung mit gleicher Schwingungsrichtung.

Bewegt man nun das mit der Hand gefafste Ende des Schlauches in bestimmtem Takte auf und ab, so interferirt der hierdurch erregte Wellenzug mit dem vom anderen Ende her zurückgeworfenen, und es bilden sich stehende Wellen mit Knoten und Bäuchen. Da sowohl am festen als an dem mit der Hand gehaltenen Ende ein Knoten liegen mufs, und zwei benachbarte Knoten oder Bäuche immer um eine halbe Wellenlänge voneinander entfernt sind, so mufs der Rhythmus der Bewegung so geregelt werden, dafs eine ganze Anzahl halber Wellenlängen auf die Länge des Schlauches geht. Die Versuche gelingen leichter, wenn man mit der Hand kreisförmige Schwingungen ausführt, die ja als aus zwei zu einander senkrechten geradlinigen Schwingungen zusammengesetzt angesehen werden können; dann beschreiben alle bewegten Punkte des Schlauches Kreise, deren

Ebenen auf der Längsrichtung des Schlauches senkrecht stehen (transversale kreisförmige Schwingungen). Sehr schön beobachtet man die stehenden Wellen an einem Zwirnfaden, den man an einer Zinke einer Stimmgabel oder an der schwingenden Feder eines magnetischen Hammers (249) befestigt; je mehr man die Spannung des Fadens und damit die Fortpflanzungsgeschwindigkeit vermindert, desto gröſser wird die Anzahl der Knoten und Bäuche (Melde, 1859).

Mit der Machschen Wellenmaschine lassen sich die stehenden Wellen nachahmen, wenn man die Pendelkugeln durch einen entsprechend gebogenen Draht in ihre gröſsten Ausweichungen bringt, und sie dann gleichzeitig losläſst, indem man den Draht rasch zur Seite dreht. Dreht man alsdann die Schwingungsebenen um 90°, so verwandelt sich die transversale in eine longitudinale stehende Welle; man sieht alsdann, daſs an den Knoten, indem die beiderseits benachbarten Teilchen gleichzeitig gegen das ruhende Teilchen hin und von demselben wieder weg schwingen, abwechselnd Verdichtungen und Verdünnungen entstehen, während an den Bäuchen zwar die lebhafteste Hin- und Herbewegung, jedoch niemals Verdichtung oder Verdünnung stattfindet. Auch an dem oben (S. 397) erwähnten spiralförmig gewundenen Draht kann man stehende Longitudinalwellen erzeugen; klemmt man das eine Ende fest und übt an dem anderen Ende einen Zug in der Längsrichtung, so schwingen die Windungen des sich wieder selbst überlassenen Drahtes hier lebhaft hin und her, während im Knotenpunkt am festgeklemmten Ende die Windungen abwechselnd enger zusammengeschoben und weiter auseinander gezogen werden. Zieht man die freien Enden des Schraubendrahtes auseinander, so bildet sich ein Schwingungsknoten in der Mitte. Die Bewegung der Teilchen in einer stehenden Longitudinalwelle kann auch durch die Zeichnung Fig. 264 veranschaulicht werden, wenn man sie unter einem mit der Linie 0—12 parallelen Schlitz von rechts nach links wegzieht. Man kann auch eine solche Zeichnung um eine Walze legen, so daſs die Punkte 0—12 der Länge nach auf ihre Mantelfläche zu liegen kommen; wird die Walze hinter einem Schlitz um ihre damit parallele Achse gedreht, so ahmen die durch den Schlitz sichtbaren Punkte der Kurven die Bewegung der Teilchen einer stehenden Längswelle nach, mit Knoten bei 0, 6 und 12, und Bäuchen bei 3 und 9.

Die Verschiebung, welche eine (transversale oder longitudinale) Welle in der Entfernung $x$ von ihrem Ausgangspunkte hervorbringt, ist

$$y_1 = a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) = a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{l}{\lambda} + \frac{l-x}{\lambda}\right);$$

an derselben Stelle ($x$) verursacht eine aus der Entfernung $2l$ ihr entgegenkommende Welle von gleicher Schwingungsweite und Wellenlänge die Ausweichung:

$$y_2 = a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{2l-x}{\lambda}\right) = a \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{l}{\lambda} - \frac{l-x}{\lambda}\right).$$

Die aus der Interferenz beider Bewegungen hervorgehende Verschiebung im Punkt $x$ ist demnach

$$Y = y_1 + y_2 = 2a \cos 2\pi \frac{l-x}{\lambda} \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{l}{\lambda}\right).$$

In dieser Gleichung einer stehenden Welle stellt $2a \cos 2\pi \frac{l-x}{\lambda}$ die von Stelle zu Stelle periodisch sich ändernde Amplitude, $\sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{l}{\lambda}\right)$ den allen Punkten gemeinsamen Schwingungszustand vor.

---

## B. Schall.

## (Akustik.)

287. **Schall** nennen wir jede Empfindung, welche uns durch das Gehör von aufsen her vermittelt wird. Bei jeder Schallempfindung können wir leicht den Körper bezeichnen, von dem der Schall ausgeht, und uns durch den Gesichts- und Gefühlssinn überzeugen, dafs dieser Körper, die „Schallquelle", sich in zitternder oder schwingender Bewegung befindet.

Bringt man ein sog. Weckerwerk, dessen Uhrwerk ein Hämmerchen gegen eine Metallglocke schlagen läfst, unter den Recipienten der Luftpumpe, so hört man die Glockenschläge nicht mehr oder nur äufserst schwach, wenn man den Recipienten möglichst luftleer gepumpt hat; sie werden aber nach und nach wieder ebenso stark hörbar wie anfangs, wenn man die Luft allmählich wieder zutreten läfst. Im leeren Raum pflanzt sich der Schall nicht fort. Der Knall der heftigsten Explosion kann sich nicht über die Grenzen unserer Atmosphäre hinaus fortpflanzen, und ebensowenig könnten wir einen aufserhalb der Atmosphäre erregten Schall vernehmen. In verdünnter Luft, z. B. auf hohen Bergen, ist die Stärke des Schalles viel geringer als in Luft von gewöhnlicher Dichte.

Nicht nur in der Luft und in den übrigen Gasarten, sondern auch in flüssigen und festen Körpern pflanzt sich der Schall fort. Ein Taucher hört, was am Ufer gesprochen wird, und die leisesten Schläge an das Ende eines langen Balkens sind einem ans andere Ende gelegten Ohr vernehmbar. Das Fadentelephon, ein bekanntes Kinderspielzeug, besteht aus zwei über Hohlcylinder gespannten Membranen, deren Mitten durch einen langen Faden verbunden sind. Gegen die eine Membran gesprochene Worte werden bei straff gespanntem Faden an der anderen deutlich gehört.

288. **Vorgang der Fortpflanzung.** Dafs nicht etwa Teilchen des schallerregenden Körpers selbst oder die ihn umgebenden Luft-

teilchen bis zu unserem Ohre fortgeschleudert werden, ergibt sich schon aus der Thatsache, dafs die Schläge des Weckers, nachdem er mit der Glasglocke bedeckt worden, zwar gedämpft aber noch deutlich genug gehört werden; denn Glas ist, wie wir wissen, für Luft- und andere Stoffteilchen undurchdringlich. Es ist vielmehr nur denkbar, dafs der schallerregende Körper seine Erzitterungen auf die Luftteilchen im Innern der Glocke, diese sie sodann auf die Glasteilchen, und diese wieder auf die Teilchen der äufseren Luft nach und nach übertragen. Ein Bild von dieser Art der Fortpflanzung gibt uns eine Reihe gleicher elastischer Kugeln (Perkussionsmaschine, 55); läfst man die erste Kugel auf die zweite stofsen, so gibt sie an diese ihre Geschwindigkeit ab und kommt selbst zur Ruhe, die zweite überträgt ebenso ihre Bewegung an die dritte u. s. f. bis zur letzten, und die ganze Reihe von Kugeln entlang läuft eine fortschreitende longitudinale Welle. Sind die Kugeln nicht alle gleich, folgt z. B. auf eine Reihe kleinerer unter sich gleicher Kugeln eine Reihe gröfserer ebenfalls unter sich gleicher Kugeln, so kommt an der Grenze beider Reihen die stofsende Kugel nicht zur Ruhe, und es kehrt ein Teil der Welle in die zugehörige Reihe zurück, oder wird zurückgeworfen (reflektirt), während ein anderer Teil in die andere Reihe weitergeht. War die gröfsere Kugel die stofsende, so behält sie die Richtung ihrer Bewegung bei, und erteilt der kleineren Kugel eine gröfsere Geschwindigkeit; stöfst dagegen die kleinere Kugel, so kehrt sie um, während die gröfsere mit geringerer Geschwindigkeit vorwärts geht.

In ähnlicher Weise pflanzen sich bei dem Versuche mit dem Weckerwerk die Erzitterungen der Metallglocke durch die Reihe der Luftteilchen als longitudinale Welle bis zur Glaswand fort, diese erfährt hier beim Übergang auf die gröfseren Massenteilchen des Glases eine teilweise Zurückwerfung; die im Glas weitergehende Welle wird beim Übergang aus dem Glas in die äufsere Luft abermals teilweise zurückgeworfen und wird daher von aufsen nur gedämpft vernommen.

289. **Schwächung des Schalles durch Ausbreitung.** Von einem schwingenden Punkt breitet sich die Schallbewegung in Luft von gleichmäfsiger Beschaffenheit kugelförmig aus, in Kugelschalen, welche sich abwechselnd im Zustand der Verdichtung und Verdünnung befinden; jeder Radius einer solchen kugelförmigen Welle heifst ein Schallstrahl, und die Schwingungen der Luftteilchen erfolgen in der Längsrichtung des Strahls.

Da die Oberflächen dieser Kugelschalen und demnach auch die in ihnen bei gleicher Dicke enthaltenen Massen im quadratischen Verhältnis ihrer Radien wachsen und sich demnach die von der Schallquelle ausgehende Bewegungsenergie auf immer gröfsere Luftmassen verteilt, so mufs die Stärke des Schalles pro Flächeneinheit mit wachsender Entfernung abnehmen, und zwar steht sie im umgekehrten Verhältnis des Quadrats der Entfernung, d. h. in der zwei-,

drei-, vier ... fachen Entfernung von der Schallquelle ist die Stärke, mit welcher der Schall in unser Ohr dringt, nur noch $^1/_4$, $^1/_9$, $^1/_{16}$ ... von derjenigen, welche wir in der Entfernung 1 vernommen hatten. Wird die allseitig freie Ausbreitung der Schallstrahlen verhindert, indem man z. B. den Schall in einer überall gleichweiten Röhre sich fortpflanzen läfst, so findet eine solche Schwächung nicht statt. Darauf beruht die Anwendung der Kommunikationsrohre (Sprachrohre) in Gasthöfen, Fabriken, auf Dampfbooten etc.

290. **Fortpflanzungsgeschwindigkeit.** Zur Ermittelung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in der Luft wurden an zwei Stationen, deren Entfernung genau gemessen war, bei Nacht in vorher verabredeten Zeitpunkten Kanonen abgefeuert und an jeder Station die Zeit beobachtet, welche zwischen dem gesehenen Lichtblitz und dem gehörten Knall verstrich (Kommission der Pariser Akademie unter A. v. Humboldt und Arago, 1822). Teilt man die gemessene Entfernung durch den Mittelwert der Zeiten, welche der Schall brauchte, um sie hin und her zurückzulegen, so ergibt sich, unabhängig von der Windrichtung, sein Weg in einer Sekunde. Die Geschwindigkeit des Schalles wurde auf diese Weise gleich 340 m bei 16° C. gefunden; sie nimmt zu mit der Temperatur, ist aber vom Luftdruck unabhängig. In Flüssigkeiten und festen Körpern pflanzt sich der Schall mit ungleich gröfserer Geschwindigkeit fort; im Wasser z. B. legt er 1435 m in einer Sekunde zurück (Colladon und Sturm, 1827).

Ist $V$ die Fortpflanzungsgeschwindigkeit longitudinaler Wellen in irgend einem Mittel, so erzeugt eine Schwingung von der Dauer $T$ eine Welle von der Länge $\lambda = VT$. Wird in einem anderen Mittel, dessen Fortpflanzungsgeschwindigkeit $V'$ ist, eine Welle von derselben Länge $\lambda$ durch eine Schwingung von der Dauer $T'$ hervorgebracht, so ist hier $\lambda = V'T'$. Man hat daher $VT = V'T'$, oder

$$V : V' = T' : T = \frac{1}{T} : \frac{1}{T'}\,.$$

Man denke sich nun die Strecke $\lambda$ durch Schnitte senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung in gleichviele sehr dünne Schichten zerlegt, so verhalten sich die Massen dieser Schichten wie die Dichten der beiden Mittel, und die Kräfte, unter deren Einflufs die Schichten in der Längsrichtung hin- und herschwingen, verhalten sich wie die Elasticitäten $e$ und $e'$. In dem Ausdruck $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{p}}$, welcher die Schwingungsdauer angibt (53), ist demnach die Masse $m$ der Dichte $d$, die Kraft $p$ der Elasticität $e$ proportional zu setzen. Es ergiebt sich daher:

$$T : T' = \sqrt{\frac{d}{e}} : \sqrt{\frac{d'}{e'}} \text{ oder } \frac{1}{T} : \frac{1}{T'} = \sqrt{\frac{e}{d}} : \sqrt{\frac{e'}{d'}}\,,$$

folglich:

$$V : V' = \sqrt{\frac{e}{d}} : \sqrt{\frac{e'}{d'}}\,,$$

d. h. die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten verhalten sich direkt wie die Quadratwurzeln aus den elastischen Kräften und umgekehrt wie die Quadratwurzeln aus den Dichten der Mittel. Bei geeigneter Wahl der Einheiten kann man mit Newton (1687) setzen:

$$V = \sqrt{\frac{e}{d}}.$$

Bei gasförmigen Körpern ist die elastische Kraft nichts anderes als die Expansivkraft oder der Druck, und man hat statt $e$ den Druck auf die Flächeneinheit (1 qcm), statt $d$ die Masse der Volumeneinheit (1 ccm) zu setzen. Nun wiegt 1 ccm Luft von $0^0$ bei 76 cm Druck 1/773 g; ist ferner $s_0$ das spezifische Gewicht des Gases bei $0^0$ und 76 cm Druck, so ist dasselbe beim Drucke $b$ und bei der Temperatur $\vartheta^0$, wenn $\beta = 1/273$ den Ausdehnungskoëfficienten der Gase bezeichnet:

$$s = \frac{b\,s_0}{76\,(1 + \beta\,\vartheta)}.$$

Die Masse der Volumeneinheit (1 ccm) beträgt demnach $s/773$ g oder

$$\frac{b\,s_0}{773 \cdot 76\,(1 + \beta\,\vartheta)};$$

Andererseits beträgt bei dem Barometerstand $b$ der Druck auf 1 qcm $b \cdot 13{,}595$ g, wo letztere Zahl das spezifische Gewicht des Quecksilbers auf Wasser bezogen angibt; es ist also in Dynen (12) ausgedrückt

$$e = b \cdot 13{,}595 \cdot 981.$$

Setzt man diese Werte in die Newtonsche Formel ein, so erhält man die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in Gasen:

$$V = \sqrt{13{,}595 \cdot 981 \cdot 773 \cdot 76 \cdot \frac{1 + \beta\vartheta}{s_0}}.$$

Diese Geschwindigkeit der Fortpflanzung ist vom Drucke unabhängig, da bei gleichbleibender Temperatur Druck und Dichte nach dem Mariotteschen Gesetz proportional sich ändern und daher $b$ sich weghebt.

Aus der vorstehenden Formel ergibt sich die Schallgeschwindigkeit in Luft von $0^0$ ($\vartheta = 0$, $s_0 = 1$) zu 279,91 m, also erheblich kleiner als aus den Versuchen. Wie Laplace später (1816) gezeigt hat, ist nämlich in der Newtonschen Formel der Umstand nicht berücksichtigt, dafs in den verdichteten Teilen der Schallwelle die Temperatur erhöht, in den verdünnten Teilen erniedrigt wird; da bei dem geringen Leitungs- und Strahlungsvermögen der Luft diese Temperaturunterschiede innerhalb der kurzen Dauer einer Schwingung sich nicht ausgleichen können, so werden die Druckunterschiede, also die elastischen Kräfte, in dem Verhältnis $c/c' = 1{,}41$ der spezifischen Wärmen $c$ und $c'$ bei konstantem Druck und bei konstantem Volumen vergröfsert. Man hat also, um die Formel richtig zu stellen, unter dem Wurzelzeichen noch mit $c : c'$ zu multipliciren, und erhält für trockene atmosphärische Luft in naher Übereinstimmung mit der Erfahrung (in m ausgedrückt):

$$V = 332{,}4\sqrt{1 + \beta\vartheta}.$$

Die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten in den übrigen Gasen stehen im umgekehrten Verhältnis der Quadratwurzeln ihrer spezifischen Gewichte.

Bei festen Körpern ist statt $e$ der Elasticitätsmodul $E$ (52) zu setzen, bei Flüssigkeiten ist $e$ aus der Zusammendrückbarkeit abzuleiten.

291. **Zurückwerfung des Schalles.** Die Schallstrahlen werden nach ähnlichen Gesetzen zurückgeworfen und gebrochen (letzteres beim Übergang in Luft von anderer Dichte oder aus Luft in andere Körper) wie die Lichtstrahlen. Von einer ebenen Fläche werden die Schallstrahlen so zurückgeworfen, als kämen sie von einem Punkt, welcher auf der von der Schallquelle auf die Fläche gefällten Senkrechten ebensoweit hinter der Fläche liegt wie die Schallquelle vor ihr. Hieraus erklärt sich das Echo. Läſst man in einiger Entfernung von einer Mauer, einer Felswand, einem Waldrand etc. einen lauten Ruf erschallen, so hört man nach der Zeit, welche der Schall braucht, um nach der Wand und wieder zurück zum Standpunkt des Rufenden zu gelangen, den Ruf von der Wand zurückschallen. Die Wand wirft nämlich den Schall ebenso zurück wie ein Spiegel das Licht, und wir hören den zurückgeworfenen Schall gerade so, als ob eine zweite Person, welche als Spiegelbild des Rufenden ebensoweit hinter der zurückwerfenden Fläche steht, wie dieser vor ihr, zu gleicher Zeit den nämlichen Ruf ertönen lieſse. Um eine Silbe auszusprechen, braucht man mindestens $^1/_5$ Sekunde; steht man daher so weit von der Wand entfernt, daſs der Schall zum Hin- und Rückweg $^1/_5$ Sekunde gebraucht, so wird der zurückgeworfene Schall gerade in dem Augenblick zurückkehren, in welchem das Aussprechen einer Silbe vollendet ist. Da der Schall in einer Sekunde 340 m zurücklegt, muſs man daher, um ein einsilbiges Echo zu vernehmen, mindestens 34 m von der Wand entfernt sein; steht man zwei-, drei-, vier- ... mal soweit von der zurückwerfenden Fläche entfernt, so wird man zwei, drei, vier ... Silben aussprechen können, ehe die erste zurückkehrt, und sonach ein zwei-, drei-, vier- ... silbiges Echo vernehmen. Ist die Fläche weniger als 34 m entfernt, so wird der zurückgeworfene Schall schon eintreffen, ehe die Silbe vollständig ausgesprochen ist, und sich mit dieser teilweise vermischen. In Kirchen und groſsen Sälen macht sich dieser Nachhall oft störend bemerklich. Sind mehrere zurückwerfende Flächen in verschiedenen Entfernungen vorhanden, so entsteht ein mehrfaches Echo. Am Lurleifelsen z. B. hört man einen Pistolenschuſs 17—20 mal mit wechselnder Stärke ähnlich dem Donnerrollen wiederholt.

Stehen sich zwei Hohlspiegel gegenüber, und bringt man in den Brennpunkt des einen eine Taschenuhr, so hört ein Beobachter, der sein Ohr in den Brennpunkt des anderen Spiegels bringt, selbst in beträchtlicher Entfernung deutlich das Ticken der Uhr; die von letzterer ausgehenden Schallstrahlen werden nämlich von dem ersten Spiegel in paralleler Richtung auf den zweiten geworfen und von diesem in seinem Brennpunkt gesammelt. Läſst man die vom ersten Spiegel zurückkommenden parallelen Strahlen auf eine Glasplatte fallen, so werden sie von dieser unter gleichen Winkeln zurückgeworfen und können durch Drehen der Platte nach jeder beliebigen Richtung gelenkt werden.

**Auf die Zurückwerfung des Schalles gründen sich auch das**

Sprachrohr und das Hörrohr. Das Sprachrohr ist ein mit Mundstück versehenes, nach vorn sich trichterförmig erweiterndes Rohr aus Blech, Pappe oder Guttapercha, durch welches die hineingesprochenen Worte auf gröfsere Entfernung hörbar gemacht werden. Die von dem Mundstück ausgehenden Schallstrahlen werden nämlich an der Wand des Rohres so zurückgeworfen, dafs sie dasselbe sämtlich nahezu in der Richtung, nach welcher das Rohr gewendet ist, verlassen und nun, ohne sich durch Ausbreitung abzuschwächen, gesammelt in die Ferne dringen. Durch ein Sprachrohr von 1,5—2 m Länge und 15—25 cm Öffnung, wie sie auf Schiffen gebräuchlich sind, kann man sich auf 1500—1900 m Entfernung verständlich machen. Das Hörrohr hat die umgekehrte Aufgabe, die in seinen Trichter eintretenden Schallstrahlen durch Zurückwerfung in der in den Gehörgang gesteckten engen Mündung zu vereinigen und dadurch für Schwerhörige ein deutlicheres Hören zu vermitteln. Das Stethoskop ist ein Hörrohr für Ärzte zum Behorchen (Auskultiren) der Atem- und Herzgeräusche.

Ein im Mittelpunkt eines kugelförmigen Raumes erzeugter Schall wird von allen Seiten wieder nach diesem Mittelpunkt zurückgeworfen. Schallwellen, welche von dem einen Brennpunkt einer Ellipse ausgehen, werden an derselben so zurückgeworfen, dafs sie in dem anderen Brennpunkte gleichzeitig zusammentreffen; in einem Saal, dessen Wände elliptisch gewölbt sind, wird man daher die am einen Brennpunkt leise gesprochenen Worte am andern deutlich vernehmen, während im ganzen übrigen Raume nichts gehört wird. Gebäude, welche absichtlich oder zufällig so gebaut sind, dafs das, was an einem Punkt in ihrem Innern leise gesprochen wird, nur an einem bestimmten anderen Punkt gehört werden kann, nennt man Sprachgewölbe. — Säle für Parlamente und Konzerte müssen akustisch, d. h. so gebaut sein, dafs die von der Rednerbühne oder dem Orchester ausgehenden Schallwellen nach dem Zuhörerraum zurückgeworfen werden und keine anderen unzweckmäfsigen oder störenden Zurückwerfungen erleiden.

Die Schallwellen werden nicht nur an festen Wänden, sondern auch überall da zurückgeworfen wo sie in ein Mittel von anderer Beschaffenheit, z. B. aus dichterer in dünnere Luft oder umgekehrt, überzugehen genötigt sind. Bei Tage wird der Schall viel weniger weit gehört als bei Nacht, weil im ersteren Falle der Schall durch die zahlreichen Zurückwerfungen, welche er an den ungleich erwärmten und deswegen ungleich dichten auf- und absteigenden Luftströmen erleidet, geschwächt wird, während er sich in der gleichmäfsig erwärmten Nachtluft ungehindert fortpflanzt. Tyndall hat beobachtet, dafs die Nebelsignale, welche an den Küsten zur Warnung der Seefahrer durch Dampfpfeifen oder grofse Sirenen gegeben werden, bei nebeligem Wetter viel weiter zu hören sind als bei klarer Luft, weil letztere durch die Sonnenstrahlen ungleich erwärmt und

dadurch für den Schall weniger durchlässig oder gleichsam durch eine „akustische Wolke“ getrübt ist.

292. **Verschiedenartige Schallempfindungen. Sirene.** Die Schallempfindungen sind sehr mannigfaltiger Art, und dem entsprechend ist unsere Sprache sehr reich an Bezeichnungen, um die Eigenart derselben auszudrücken. Durch eine einzelne heftige Erschütterung wird ein Knall hervorgebracht; durch eine unregelmäſsige Aufeinanderfolge von Erschütterungen entstehen die Geräusche (Rauschen, Brausen, Prasseln, Rasseln, Plätschern, Knistern, Klirren, Knirschen etc.). Ein Klang oder Ton dagegen wird durch eine regelmäſsige in gleichen Zeitabschnitten sich wiederholende (periodische) oder „schwingende“ Bewegung des tönenden Körpers hervorgebracht. Man kann z. B. einen Klang hervorbringen durch ein Kartenblatt, das man gegen den Rand eines gleichmäſsig rotirenden Zahnrads (Savart) hält, oder durch Luftstöſse, welche nach gleichen Zeiten in derselben Weise wiederkehren; letzteres geschieht mittels der Sirene, deren einfachste von Seebeck (1843) angegebene Form in einer runden Papp- oder Metallscheibe besteht, in welche mehrere kreisförmige Reihen von unter sich gleichweit abstehenden Löchern eingeschlagen sind. Bläst man durch ein Glasröhrchen gegen die innerste Lochreihe, während die Scheibe mittels einer Schwungmaschine in rasche gleichmäſsige Umdrehung versetzt wird, so wird dem aus dem Röhrchen entweichenden Luftstrom der Weg geöffnet, sobald ein Loch vor seine Mündung tritt, dagegen versperrt, sobald ein undurchbohrter Teil der Scheibe dort ankommt. Die so in gleichen Zwischenräumen aufeinander folgenden Luftstöſse bringen in unserem Ohr die Empfindung eines Klanges von bestimmter Tonhöhe hervor. Wird nun bei gleicher Drehungsgeschwindigkeit eine der äuſseren Lochreihen angeblasen, welche mehr Löcher enthält und deshalb in der gleichen Zeit eine gröſsere Anzahl von Luftstöſsen gibt, so beurteilen wir den jetzt gehörten Klang als höher gegen den vorigen und erkennen daraus, daſs ein Ton um so höher ist, je gröſser die in gleicher Zeit erfolgende Anzahl seiner Bewegungsperioden oder je gröſser seine Schwingungszahl ist. Eine vollkommenere Sirene, welche durch den Luftstrom selbst in Umdrehung versetzt wird, hat Cagniard-Latour konstruirt. Fig. 264 zeigt dieselbe in der noch mehr vervollkommneten Gestalt, welche Dove ihr gegeben hat. Eine wagrechte von vier Löcherreihen durchbohrte Metallscheibe *de* dreht sich sehr leicht um eine lotrechte

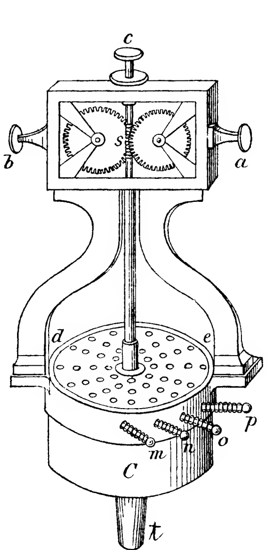


Fig. 264.
Sirene.

Achse. Die Scheibe befindet sich über einem cylindrischen Windkasten *C*, dessen Deckel von entsprechenden Löchern durchbohrt ist. Die Löcher des Deckels sowohl wie diejenigen der Scheibe sind mit entgegengesetzter Neigung schräg gebohrt, so dafs der aus einem Loch des Deckels schief austretende Luftstrom ungefähr rechtwinklig gegen die Wände der Löcher der Scheibe stöfst und dieselbe dadurch in Umdrehung versetzt. Jeder Lochreihe entspricht unter dem Deckel noch ein drehbarer Metallring mit ebensoviel Löchern wie die zugehörige Reihe; diese Ringe können jeder für sich mittels federnder Stifte *mnop* entweder so gestellt werden, dafs ihre undurchbohrten Teile die Löcher des Windkastendeckels schliefsen, oder so, dafs die Löcher eines Ringes auf die Löcher der zugehörigen Reihe des Deckels passen. Durch Drücken an einen oder mehrere Stifte kann man daher nach Belieben eine oder mehrere Lochreihen anblasen. Der Windkasten wird mittels des Rohres *t* auf einen Blasetisch aufgesetzt. Die Achse der Scheibe trägt oben eine Schraube ohne Ende *s*, welche in die Zahnräder eines Zählwerkes eingreift, an dessen (in der Zeichnung nicht sichtbaren) Zifferblättern die Anzahl der in gemessener Zeit stattgehabten Umdrehungen abgelesen und danach die Schwingungszahl für eine Sekunde bestimmt werden kann. Durch einen Druck auf den Knopf *a* kann das Zählwerk in Thätigkeit gesetzt, durch einen Druck auf *b* wieder ausgeschaltet werden.

293. **Tonleiter.** Die erste Lochreihe unserer Sirene enthält 8, die zweite 10, die dritte 12, die vierte 16 Löcher. Wird die erste und dann die vierte Lochreihe angeblasen, so erhält man zwei Klänge, welche in der Musik als Grundton (Prime) und Oktave unterschieden werden. Die Oktave macht also in derselben Zeit doppelt so viele Schwingungen als der Grundton. Läfst man beide Töne gleichzeitig erklingen, so verschmelzen sie ungestört zu einer angenehmen Gehörempfindung: sie bilden eine Konsonanz. Eine Konsonanz ist erfahrungsgemäfs um so vollkommener, je einfacher das Verhältnis der Schwingungszahlen der beiden zusammenklingenden Töne sich ausdrücken läfst. Nächst dem Einklang (1:1) bilden Oktave und Grundton die vollkommenste Konsonanz, denn ihr Schwingungsverhältnis ist das denkbar einfachste, nämlich 2:1. Die nächst vollkommene Konsonanz wird erhalten durch die erste und dritte Lochreihe; der von letzterer erzeugte Ton steht zum Grundton in dem Schwingungsverhältnis 12:8 oder 3:2 und heifst die Quinte des Grundtones. Die erste und zweite Lochreihe geben das schon etwas rauher klingende Schwingungsverhältnis 10:8 oder 5:4. Der höhere Ton wird die grofse Terz des Grundtones genannt. Man bezeichnet den Grundton mit dem Buchstaben *C*, seine grofse Terz mit *E*, die Quinte mit *G*, die Oktave mit *c*. Den angenehmen Zusammenklang dreier oder mehrerer Töne nennt man einen Accord. Grundton, grofse Terz und Quinte (*CEG*) bilden zusammen den *C*dur-Accord. Indem man je zwei Lochreihen der Sirene noch in

anderer Weise zusammenklingen läßt, ergeben sich noch andere Konsonanzen. Die vierte und dritte Lochreihe geben das Schwingungsverhältnis 16:12 oder 4:3, dasjenige der Quarte; wir bezeichnen die Quarte von *C* mit *F*. Die dritte und zweite Reihe liefern das Verhältnis 12:10 oder 6:5. Wir nennen hier den höheren Ton die kleine Terz des tieferen und bezeichnen ihn in Beziehung auf den Grundton *C* mit *Es*. Überblicken wir vorläufig diese Reihe von Klängen, welche auch bei geänderter Drehungsgeschwindigkeit ihre musikalische Eigenart beibehält, so erhalten wir, wenn die kleine Terz weggelassen wird, folgende Zusammenstellung, bei der unter der Bezeichnung des Klanges sein Schwingungsverhältnis zum Grundton angegeben ist:

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| *C* | *E* | *F* | *G* | *c* |
| 1 | $^5/_4$ | $^4/_3$ | $^3/_2$ | 2. |

Um den Anforderungen der Musik zu genügen, muſs jeder Klang wieder der Grundton eines *C*dur-Accordes sein, d. h. man muſs von jedem Ton aus wieder in Terzen und Quinten aufsteigen können. Nun müſste die Quinte von *G* $^3/_2$ mal soviel Schwingungen machen wie *G*, also $^3/_2 \times {}^3/_2 = {}^9/_4 = 2\,^1/_4$. Der so gefundene Klang ist höher als die Oktave *c*; die nächst niedere Oktave des Tones $^9/_4$ dagegen hat die Schwingungszahl $^9/_8$ und liegt innerhalb unserer Oktave; den entsprechenden Klang bezeichnet man mit *D* und nennt ihn die Sekunde von *C*. Die groſse Terz von *G* hat die Schwingungszahl $^3/_2 \times {}^5/_4 = {}^{15}/_8$; sie heiſst die Septime des Grundtones und wird mit *H* bezeichnet. Der Quinte des Tones *F* entspricht die Schwingungszahl $^4/_3 \times {}^3/_2 = 2$; die Oktave von *C* ist also zugleich die Quinte von *F*. Die groſse Terz von *F* besitzt das Schwingungsverhältnis $^4/_3 \times {}^5/_4 = {}^5/_3$, wird mit *A* bezeichnet und Sexte genannt. So erhalten wir die diatonische (Dur-) Tonleiter, welche innerhalb einer Oktave aus folgenden Tönen: Grundton oder Prime *C*, Sekunde *D*, groſse Terz *E*, Quarte *F*, Quinte *G*, Sexte *A*, Septime *H*, Oktave *c* besteht, mit den in der folgenden Reihe darunter gesetzten zugehörigen Schwingungsverhältnissen:

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *C* | *D* | *E* | *F* | *G* | *A* | *H* | *c* |
| 1 | $^9/_8$ | $^5/_4$ | $^4/_3$ | $^3/_2$ | $^5/_3$ | $^{15}/_8$ | 2. |

Dividirt man die Schwingungszahl jedes dieser Töne durch die des vorhergehenden, so erhält man das Intervall der beiden Töne, d. h. die Zahl, welche angibt, wie vielmal gröſser die Schwingungszahl des Tones ist als die des nächst niedrigeren. In der folgenden Reihe sind die Werte dieser Intervalle in der zweiten Zeile zwischen die in der ersten Zeile stehenden Tonzeichen gesetzt:

$$\begin{array}{ccccccccccccccc} C & & D & & E & & F & & G & & A & & H & & c \\ & ^9/_8 & & ^{10}/_9 & & ^{16}/_{15} & & ^9/_8 & & ^{10}/_9 & & ^9/_8 & & ^{16}/_{15}. & \end{array}$$

Man sieht, daſs die Intervalle in der diatonischen Tonleiter keineswegs gleich sind. Die Intervalle zwischen Terz und Quarte und

zwischen Septime und Oktave ($^{16}/_{15}$) sind bedeutend kleiner als die übrigen. Man sagt daher, das Intervall von *E* zu *F* und von *H* zu *c* betrage einen halben Ton; während man die übrigen Intervalle als solche ganzer Töne rechnet. Um ein Fortschreiten nach gleichmäſsigeren Intervallen möglich zu machen, müssen daher zwischen den ganzen Tönen noch halbe Töne eingeschaltet werden, und die ganze aus zwölf Tönen bestehende Tonreihe einer Oktave (die chromatische Tonleiter) lautet alsdann:

*C Cis D Dis E F Fis G Gis A B H c.*

Da jedoch auch die ganzen Töne keine gleichen Intervalle besitzen sondern von *C* zu *D*, von *F* zu *G*, von *A* zu *H* um einen groſsen ganzen Ton ($^{9}/_{8}$), von *D* zu *E* und von *G* zu *A* um einen kleinen ganzen Ton ($^{10}/_{9}$) fortgeschritten wird, so sind auch in der chromatischen Tonleiter die Intervalle nicht einander gleich, ein Übelstand, der es unmöglich macht, von jedem beliebigen Ton als Grundton aus in gleicher Weise aufzusteigen. Schreitet man z. B. in reinen Terzen fort, so kommt man zu einer unreinen Oktave, ebenso beim Fortschreiten in reinen Quinten. Da aber die Oktave die vollkommenste Konsonanz bildet, deren Unreinheit am unangenehmsten empfunden wird, so opfert man lieber die Reinheit der übrigen Töne, indem man sie, wie die Musiker sagen, etwas ober- oder unterhalb ihrer von der diatonischen Tonleiter geforderten Höhe „schweben“ läſst, und hält die Reinheit der Oktaven mit Strenge aufrecht. Eine solche Ausgleichung heiſst Temperatur. Die gleichschwebende Temperatur, welche die einfachste und verbreitetste ist und allen musikalischen Instrumenten mit fester Stimmung (z. B. dem Piano) zu Grunde liegt, nimmt alle Intervalle einander gleich; da in der chromatischen Tonleiter 12 Tonstufen vorhanden sind, so muſs das Intervall eines Halbtones so gewählt werden, daſs es, zwölfmal wiederholt, zur reinen Oktave führt, d. h. zu einer Schwingungszahl, welche doppelt so groſs ist als diejenige des Grundtones, d. h. wenn $x$ das gesuchte Intervall bezeichnet, so muſs $x^{12} = 2$ sein. Dieses Intervall wird daher ausgedrückt durch die Zahl $\sqrt[12]{2} = 1{,}05946$. Man gelangt so zur gleichschwebenden Tonleiter mit folgenden Schwingungsverhältnissen:

| | | | |
|---|---|---|---|
| *C* . . . . . . . . | 1,00000 | *G* . . . . . . . . | 1,49831 |
| *Cis* . . . . . . . . | 1,05946 | *Gis* . . . . . . . . | 1,58740 |
| *D* . . . . . . . . | 1,12246 | *A* . . . . . . . . | 1,68179 |
| *Dis* . . . . . . . | 1,18921 | *B* . . . . . . . . | 1,78180 |
| *E* . . . . . . . . | 1,25992 | *H* . . . . . . . . | 1,88775 |
| *F* . . . . . . . . | 1,33484 | *c* . . . . . . . . | 2,00000 |
| *Fis* . . . . . . . . | 1,41421 | | |

in welcher jede Schwingungszahl aus der des vorhergehenden Halbtones durch Multiplikation mit der Zahl 1,05946 erhalten wird.

294. **Absolute Schwingungszahlen.** Bisher wurden bloſs die Schwingungsverhältnisse der Töne innerhalb einer Oktave, nicht

aber ihre **absoluten Schwingungszahlen** in Betracht gezogen. Kennt man aber für einen dieser Töne die absolute Schwingungszahl, d. h. die Anzahl seiner Schwingungen in einer Sekunde, so kennt man sie für alle, weil ja die Schwingungsverhältnisse bekannt sind.

Zur Bestimmung absoluter Schwingungszahlen kann die Sirene dienen. Gesetzt, man wollte die Schwingungszahl einer Stimmgabel ermitteln, so gibt man der Sirene eine solche Umdrehungsgeschwindigkeit, dafs eine ihrer Löcherreihen denselben Ton gibt wie die Stimmgabel; aus der am Zählwerk abgelesenen Anzahl der Umdrehungen pro Sekunde und der Anzahl der Löcher ergibt sich alsdann die Anzahl der Schwingungen der Stimmgabel in einer Sekunde.

Als Grundlage für die Stimmung der musikalischen Instrumente wird in der Regel der sog. **Kammerton** (das eingestrichene $a$) gewählt, welches durch eine Normalstimmgabel angegeben wird. Während früher für diesen Kammerton in den verschiedenen Ländern verschiedene Schwingungszahlen gebräuchlich waren, ist seit 1885 durch internationale Vereinbarung die Schwingungszahl für das temperirte $a$ zu 435 festgesetzt worden. Für die Rechnung sehr bequem ist die **physikalische Stimmung**, welche das eingestrichene $c$ zu 256, das temperirte $a$ sonach zu 430,5 Schwingungen annimmt. Hiernach ergeben sich für die in der folgenden kleinen Tabelle näher bezeichneten Grundtöne der in der Musik benutzten Oktaven die beigefügten absoluten Schwingungszahlen:

| Oktavlage | | Internationale Stimmung | Physikalische Stimmung |
|---|---|---|---|
| Subcontra-$C$ . . . . . . | $c_{-3}$ | 16,2 | 16 |
| Contra-$C$ . . . . . . . | $c_{-2}$ | 32,3 | 32 |
| Grofses $C$ . . . . . . . | $c_{-1}$ | 64,7 | 64 |
| Kleines $C$ . . . . . . . | $c_0$ | 129,3 | 128 |
| Eingestrichenes $C$ . . . | $c_1$ | 258,7 | 256 |
| Zweigestrichenes $C$ . . . | $c_2$ | 517,3 | 512 |
| Dreigestrichenes $C$ . . . | $c_3$ | 1034,6 | 1024 |

Das Subcontra-$C$ von 16 Schwingungen bildet die untere Grenze der Wahrnehmbarkeit für das menschliche Ohr; die obere Grenze liegt zwischen $c_7$ und $c_8$ (17 bis 34 000 Schwingungen) Das menschliche Gehör umfafst sonach 10 Oktaven. Die in der Musik gut brauchbaren Töne liegen zwischen 40 und 4000 Schwingungen, was einem Intervall von etwa 7 Oktaven entspricht.

295. **Wellenlänge.** Wenn die Schwingungszahl eines Tones bekannt ist, läfst sich auch sehr leicht seine Wellenlänge in Luft angeben. **Alle Töne**, hohe und tiefe, **pflanzen sich nämlich in der Luft mit der gleichen Geschwindigkeit** von 340 m in einer

Sekunde fort; denn, wenn etwa die hohen Töne den tiefen voraneilten oder umgekehrt, so müfste ein aus einiger Entfernung angehörtes Musikstück als unerträgliches Durcheinander erscheinen, weil die zu demselben Taktschlag gehörigen hohen und tiefen Töne nicht gleichzeitig das Ohr des Hörers erreichen würden. Da nun jede ganze Schwingung auch eine ganze Welle erzeugt, so müssen auf die Strecke von 340 m so viele Wellen gehen, als in einer Sekunde Schwingungen stattfinden. Die Länge einer Welle findet man daher, indem man die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles durch die Schwingungszahl dividirt. Für den Ton $a_1$ von 435 Schwingungen z. B. ergibt sich die Wellenlänge $= {}^{340}/_{435} = 0{,}782$ m $=$ 782 mm.

296. **Pfeifen.** Eine schwingende Stimmgabel, frei in die Luft gehalten, gibt nur einen sehr schwachen kaum hörbaren Ton. Der Ton wird aber kräftig gehört, wenn man die Stimmgabel vor die Mündung einer Röhre von geeigneter Länge, z. B. über ein cylindrisches Glasgefäfs hält, in welchem man durch Eingiefsen von Wasser die Luftsäule so lange verkürzt, bis ein kräftiges Mitklingen derselben eintritt. Für die *a*-Stimmgabel z. B. findet man, dafs zu diesem Behuf die Luftsäule 195 mm lang sein mufs, d. h. gleich dem vierten Teil der Wellenlänge 782 mm. So ergibt sich überhaupt, dafs die Länge der kürzesten Luftsäule, welche durch einen schwingenden Körper zum Mitklingen erregt wird, gleich einem Viertel der Länge der Schallwelle sein mufs, die von dem schwingenden Körper ausgeht. Die eintretende Luftwelle wird nämlich am geschlossenen Ende der Röhre zurückgeworfen; durch das Zusammenwirken (Interferenz) der zurückgeworfenen mit den neu einfallenden Wellen wird in der Röhre jener eigentümliche Schwingungszustand hervorgerufen, den wir als stehende Longitudinalwelle bereits kennen gelernt haben. Am geschlossenen Ende der Röhre wird die Welle, in welcher die zur Achse der Röhre senkrechten Luftschichten nach deren Längsrichtung hin- und herschwingen, mit entgegengesetzter Schwingungsrichtung zurückgeworfen (vgl. 286), und sonach die Bewegung der einfallenden Welle durch die der zurückgeworfenen stets aufgehoben. Die dem geschlossenen Ende der Röhre anliegende Luftschicht bleibt also immer in Ruhe und bildet einen Knoten. Solche ruhig stehen bleibenden Luftschichten oder Knoten bilden sich auch an den Stellen, welche um $^1/_2$, $^2/_2$, $^3/_2$. $^4/_2$ . . . Wellenlängen vom Boden der Röhre entfernt sind. In den Punkten dagegen, welche um $^1/_4$, $^3/_4$, $^5/_4$, $^7/_4$ . . . Wellenlängen vom Boden der Röhre abstehen, begegnen sich einfallende und zurückgeworfene Welle immer mit gleicher Schwingungsrichtung. An diesen Stellen, welche Bäuche genannt werden, findet also stets ein lebhaftes Hin- und Herschwingen der Luftschichten statt. Die an den Knoten gelegenen Luftschichten erfahren, indem die benachbarten Luftschichten entweder gleichzeitig gegen sie hin, oder gleichzeitig von ihnen weg schwingen, abwechselnd Verdichtung und Verdünnung, und zwar so, dafs zwei benachbarte Knoten sich immer in entgegengesetzten

Zuständen befinden. In den Bäuchen dagegen findet während des ganzen Verlaufes der Bewegung niemals Verdichtung und Verdünnung statt, wohl aber die lebhafteste Hin- und Herbewegung der Luftschichten. Dabei gehen alle schwingenden Teilchen gleichzeitig durch ihre Gleichgewichtslage, und erreichen gleichzeitig ihre weiteste Entfernung (Schwingungsweite) von derselben, die von den Bäuchen aus, wo sie am gröſsten ist, gegen die benachbarten Knoten hin, wo sie Null ist, stetig abnimmt. Eine in solche stehende Wellenbewegung versetzte Luftmasse wird dadurch zu einem selbsttönenden Körper oder zu einer Schallquelle. Da das offene Ende der Röhre mit der äuſseren Luft in Verbindung steht, so kann hier weder Verdichtung noch Verdünnung statthaben; es muſs sich daselbst notwendig ein Bauch bilden. Soll daher die in einer Röhre enthaltene

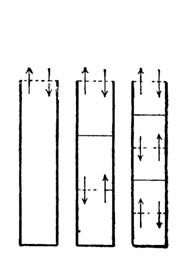


Fig. 265.
Schwingungsformen einer einerseits geschlossenen Röhre.

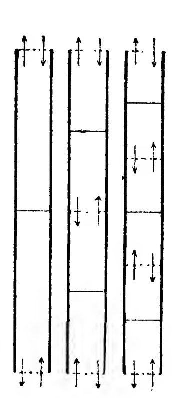


Fig. 266.
Schwingungsformen einer beiderseits offenen Röhre.

Luft durch einen schwingenden Körper zum Mitklingen gebracht, d. h. in stehende Wellenbewegung versetzt werden, so muſs ihre Länge $^1/_4$ oder $^3/_4$ oder $^5/_4$ u. s. f. von der Wellenlänge des erregenden Tones betragen. Man kann sich in der That leicht überzeugen, daſs durch die nämliche Stimmgabel auch eine 3 oder 5 mal so lange Luftsäule zum Erklingen gebracht wird, eine 2 oder 4 mal so lange aber nicht. Ein und dieselbe Röhre wird ansprechen auf diejenigen Töne, deren Viertelwelle einmal oder dreimal oder fünfmal u. s. f. in ihrer Länge enthalten ist, deren Schwingungszahlen sich demnach verhalten wie die ungeraden Zahlen 1, 3, 5, 7 . . .; die Luftsäule teilt sich dann, indem sie die entsprechenden Töne hören läſst, durch Knoten in so viele schwingende Abteilungen, wie in Fig. 265 angedeutet ist, wo die Pfeile die abwechselnden Schwingungsrichtungen in den Bäuchen angeben. Der tiefste dieser Töne heiſst der **Grundton** der Röhre, die folgenden die **Obertöne**.

Auch in einer beiderseits offenen Röhre kann die Luft in stehende Wellenbewegungen versetzt werden; denn auch am offenen Ende der Röhre findet eine Art Reflexion der durch das andere Ende eintretenden Welle statt, da die äufsere Luft, deren Teilchen nach allen Seiten hin frei beweglich sind, als ein dünneres Mittel angesehen werden kann, als die eingeschlossene Luft, deren Beweglichkeit auf die Längsrichtung der Röhre beschränkt ist. Da diese Reflexion am dünneren Mittel erfolgt, so sind hier die Schwingungen der einfallenden und der zurückgeworfenen Welle stets gleichgerichtet, und verstärken sich zu lebhafterer Bewegung. Es müssen daher an beiden offenen Enden der Röhre Bäuche entstehen, und die Länge der Röhre beträgt $^1/_2$ oder $^2/_2$ oder $^3/_2$ u. s. f. von der Wellenlänge des anregenden Tones, und die Schwingungszahlen der Tonreihe, deren sie fähig ist, verhalten sich wie 1, 2, 3, 4, 5 . . . Beim ersten dieser Töne, dem Grundton, schwingt die Luftsäule mit einem Knoten in der Mitte, und ihre Länge ist die halbe Wellenlänge dieses Tones. Für die Obertöne teilt sie sich durch 2, 3, 4 . . . Knoten so ab, wie in Fig. 266 angedeutet ist. Der Grundton einer offenen Röhre ist die Oktave des Grundtones einer gleichlangen geschlossenen; damit eine offene Röhre denselben Grundton gebe wie eine geschlossene, mufs sie demnach doppelt so lang sein als diese (Daniel Bernoulli, 1762).

Statt durch einen schwingenden Körper kann die stehende Wellenbewegung in einer Röhre auch durch Anblasen hervorgerufen werden; eine hierzu eingerichtete Röhre heifst eine Pfeife (Lippenpfeife). Fig. 267 stellt den Durchschnitt einer offenen hölzernen Orgelpfeife dar; die in den Fufs eingeblasene Luft strömt aus dem Behälter $K$ durch den Schlitz $cd$ gegen die scharfkantige Lippe $ab$ des Mundes $abcd$. Der flache Luftstrom besitzt vermöge seiner Geschwindigkeit eine gewisse Steifigkeit und ist daher befähigt, gleich einer Stimmgabelzinke (in die Mundöffnung der Pfeife hinein und heraus) zu schwingen. Während aber die aus starrem Material verfertigte Stimmgabel ihre eigene unabänderliche Schwingungsdauer besitzt, regelt der nachgiebige Luftstrom seine Bewegungen nach der Schwingungsdauer, welche die Pfeife vermöge ihrer Länge fordert; die Pfeife erklingt daher beim Anblasen und gibt einen bestimmten, nur durch ihre Länge bedingten Grundton. Wenn eine offene Pfeife ihren Grundton gibt, bildet sich ein Schwingungsknoten in ihrer Mitte. Das Vorhandensein dieses Knotens läfst sich sehr sinnreich mittels Rud. Königs manometrischer Flammen nachweisen. In eine Seitenwand einer offenen Pfeife (Fig. 268) sind drei Löcher gebohrt, eines in der Mitte, die beiden anderen je um ein Viertel der Pfeifenlänge von den Enden der Pfeife abstehend; auf diese Löcher sind drei „manometrische Kapseln“ $a$, $b$, $c$ geschraubt, deren Einrichtung aus Fig. 269 ersichtlich ist. Das Loch $o$ in der Pfeifenwand $ww$ ist durch ein dünnes Kautschukhäutchen von dem Innenraum der Kapsel $bb$ getrennt; in diesen aber wird durch das Kaut-

schukröhrchen *d* aus dem Kästchen *ee* (Fig. 268) Leuchtgas geleitet, das nach *ee* durch den Kautschukschlauch *f* gelangt. Aus der Kapsel *bb* strömt das Leuchtgas durch das Röhrchen *s* aus und gibt angezündet eine kleine spitze Flamme. Gibt nun die Pfeife ihren Grundton, so bildet sich ein Knoten in ihrer Mitte, es finden hier abwechselnde Verdichtungen und Verdünnungen der Luft statt; bei jeder Verdichtung biegt sich das Häutchen nach aufsen, treibt das Leuchtgas aus der Kapsel in den Brenner, und die Flamme brennt hoch; bei jeder Verdünnung zieht sich das Kautschukhäutchen nach einwärts, das Leuchtgas folgt ihm, die Flamme zieht sich in den Brenner zurück und wird ganz klein. Die Abwechselungen zwischen Emporlodern und Zurücksinken des Flämmchens erfolgen

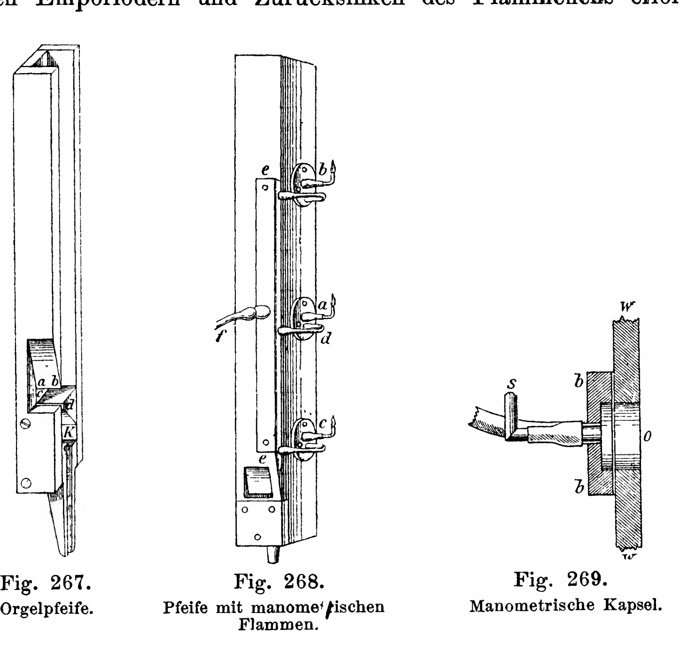



Fig. 267. Orgelpfeife.

Fig. 268. Pfeife mit manometrischen Flammen.

Fig. 269. Manometrische Kapsel.

so rasch, dafs man bei unmittelbarer Beobachtung wegen der Dauer des Lichteindruckes im Auge nur ein Erzittern der Flamme wahrnimmt. Man bedient sich daher zur Beobachtung drehbarer Spiegel (Fig. 270); ein vierseitiger säulenförmiger Körper ist auf seinen Seitenflächen mit Spiegelplatten belegt und leicht und rasch um seine lotrechte Achse drehbar; ein ruhig brennendes Flämmchen erscheint in den rasch sich drehenden Spiegeln zu einem ununterbrochenen Lichtstreifen ausgedehnt; die beim Tönen der Pfeife abwechselnd emporschiefsende und sich niederduckende Flamme dagegen zeigt sich in einzelne durch dunkle Zwischenräume getrennte Flammenbilder zerlegt (Fig. 271). Gibt die Pfeife ihren Grundton, so beweist die in ihrer Mitte angebrachte manometrische Flamme das Vorhandensein

des Knotens, während die beiden anderen Flammen verhältnismäſsig ruhig bleiben; bläst man aber stärker, so gibt die Pfeife die Oktave des Grundtones (den ersten Oberton), in ihrer Mitte befindet sich

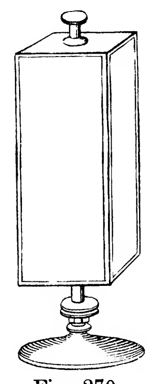


Fig. 270.
Rotirender Spiegel.

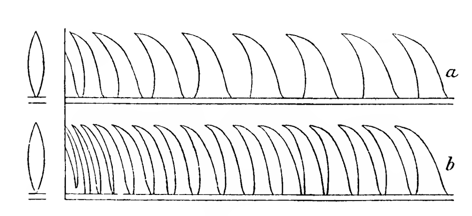



Fig. 271.
Flammenbilder im rotirenden Spiegel.

jetzt ein Bauch, während an den Stellen *b* und *c* (Fig. 268) Knoten auftreten; die mittlere Flamme brennt jetzt ziemlich ruhig, die beiden anderen aber zerlegen sich in Flammenbilder, welche bei der gleichen Drehungsgeschwindigkeit des Spiegels nur halb so weit voneinander abstehen wie die vorigen (Fig. 271 b).

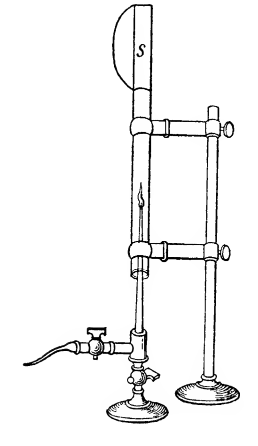



Fig. 272.
Singende Flamme.

Eine beiderseits offene Röhre kann auch durch ein in ihrem Innern nahe ihrem unteren Ende brennendes Gasflämmchen (Fig. 272) zum Tönen gebracht werden (singende Flamme, Gasharmonika); dabei schwingt das Leuchtgas abwechselnd in den Brenner hinein und wieder heraus, die Flamme erlischt und entzündet sich wieder mit einer kleinen Verpuffung, und zwar in demjenigen Tempo, in welchem die stehenden Schwingungen der Luft in der Röhre erfolgen, nach denen die Flamme ihre Bewegungen zu regeln gezwungen ist; verlängert man die Röhre durch Hinaufziehen des Schiebers *s*, so wird der Ton tiefer. Eine Röhre, die dem Tönen nahe ist, erklingt, wenn man in einiger Entfernung ihren Ton angibt (gehorsame Flamme). Im Drehspiegel betrachtet, zeigt die singende Flamme ebenfalls eine Reihe getrennter Flammenbilder.

Auf Grund der Schwingungsgesetze von Luftsäulen läſst sich die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles durch einen einfachen Versuch bestimmen. Ermittelt man nämlich mit Hilfe der Sirene die Schwingungszahl des Grundtones, den eine gedeckte Pfeife beim

Anblasen hören läſst, so erhält man die Schallgeschwindigkeit, wenn man die vierfache Länge der Pfeife (d i. die Wellenlänge ihres Grundtones) mit der Schwingungszahl multiplizirt. Füllt man die Pfeife mit irgend einem anderen Gas, so gibt sie einen anderen Ton und lehrt auf dieselbe Weise die Schallgeschwindigkeit in dem betreffenden Gas kennen. Man findet so bestätigt, daſs die Fortpflanzungsgeschwindigkeiten in verschiedenen Gasen sich umgekehrt verhalten wie die Quadratwurzeln aus deren spezifischen Gewichten. Auch die Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten kann durch Pfeifen bestimmt werden, die mit der Flüssigkeit gefüllt und durch einen Flüssigkeitsstrahl angeblasen werden.

Nimmt man die Schallgeschwindigkeit in der Luft als bekannt an, so kann man umgekehrt die Schwingungszahl z. B. einer Stimmgabel finden, indem man die Länge der Luftsäule in einer Röhre durch hineingegossenes Wasser so lange abändert, bis sie durch die Gabel möglichst kräftig zum Mittönen gebracht wird. Die Schallgeschwindigkeit (340 m) dividirt durch die vierfache Länge der Luftsäule gibt die gesuchte Schwingungszahl.

297. **Longitudinalschwingungen von Stäben.** Auch Flüssigkeitssäulen und Stäbe aus festem Material können nach denselben Gesetzen wie Luftsäulen in stehende Längsschwingungen versetzt werden. Ein Metallstab z. B. wird in dieser Weise zum Tönen gebracht, wenn man ihn in seiner Mitte oder am Ende festhält und am anderen Ende mit beharzten Fingern der Länge nach streicht; im ersteren Falle verhält er sich wie eine offene, im letzteren wie eine gedeckte Pfeife, indem seine einzelnen Querschichten in der Richtung der Länge des Stabes hin und her schwingen und an der festgehaltenen Stelle abwechselnd Verdichtung und Verdünnung hervorrufen. Man kann die lebhaften Längsschwingungen des Stabes an seinem freien Ende durch ein aufgehängtes Elfenbeinkügelchen nachweisen, das die Stirnfläche jenes Endes berührt; dasselbe wird, wenn man den Stab zum Tönen bringt, fortgeschleudert. Auch kann man ganz in derselben Weise wie bei den Pfeifen aus der Schwingungszahl des Tones und der Länge des Stabes die Schallgeschwindigkeit in der Substanz, aus welcher der Stab besteht, berechnen. Es ergibt sich z. B., daſs sich der Schall in Silber 9-, in Kupfer 12-, in Eisen $16\,^2/_3$-, in Tannenholz 18mal so schnell fortpflanzt als in der Luft.

298. **Kundtsche Röhren.** Die Knoten und Bäuche in einer tönenden Luftsäule werden durch das folgende von Kundt (1866) angegebene Verfahren sichtbar gemacht. In einem horizontal gelegten Glasrohr wird eine geringe Menge eines leichten Pulvers (Korkfeilicht) ausgebreitet. Eine engere Glasröhre, in ihrer Mitte durch einen Kork festgehalten, der das Rohr am einen Ende verschlieſst, ragt mit ihrer einen Hälfte in dasselbe hinein, und trägt an diesem ihrem inneren Ende einen Kork, der das weitere Rohr nicht ganz ausfüllt und daher ungehindert beweglich bleibt. Das andere Ende des weiteren Rohres ist durch einen Kork verschlossen,

durch dessen Verschiebung man die Länge zwischen ihm und dem vorgenannten Kork etwas abändern kann. Versetzt man nun die Glasröhre durch Reiben mit einem nassen Tuchlappen in Längsschwingungen, so bilden sich in dem Rohre stehende Wellen, die dadurch sichtbar werden, daſs sich das Pulver an den Bäuchen in feinen Querlinien, an den Knoten in runden Häufchen sammelt. Da die Entfernung zweier Knoten oder zweier Bäuche voneinander eine halbe Wellenlänge beträgt, so ergibt sich durch Division der Schallgeschwindigkeit in der Luft (340 m) durch die so ermittelte Wellenlänge sofort die Schwingungszahl der Glasröhre und daraus wie vorhin die Fortpflanzungsgeschwindigkeit im Glas, oder in anderen festen Körpern, wenn man die Glasröhre durch Stäbe aus anderen Materialien ersetzt. Aus der Schallgeschwindigkeit $V$ und der Dichte $d$ eines festen Körpers ergibt sich sodann dessen Elasticitätsmodul $E = V^2 d$ (290).

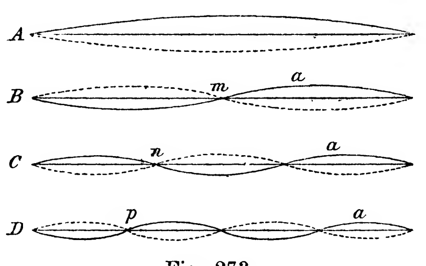



Fig. 273.
Schwingungsformen einer Saite.

299. **Saiten.** Saiten sind fadenförmige Körper, welche, wenn man sie durch Zupfen oder Anschlagen oder durch Streichen mit dem Violinbogen aus ihrer durch Spannung hervorgerufenen geradlinigen Gleichgewichtslage bringt, in stehende Quer- oder Transversalschwingungen geraten, indem ihre Teilchen in zur Längsrichtung der Saite senkrechten Bahnen gleichzeitig hin und her schwingen (Fig. 273). Um die Schwingungsgesetze der Saiten zu erforschen, kann man sich des Monochords (Fig. 274) bedienen, eines Resonanzkastens, auf welchem zwischen den beiden Stegen $a$ und $b$ die Saiten entweder mittels des Stimmstockes $s$ oder durch Gewichte $P$ ausgespannt werden. Es ergibt sich, daſs die Schwingungszahl einer Saite um so gröſser ist, je kürzer und je dünner sie ist; spannt man sie mit dem vierfachen Gewicht, so gibt sie die Oktave ihres ursprünglichen Tones, also eine doppelt so groſse Schwingungszahl, d. h. die Schwingungszahl ist der Quadratwurzel aus der Spannung proportional; macht man sie aus schwerem Material, so gibt sie einen tieferen Ton, und zwar findet man, daſs die Schwingungszahl der Quadratwurzel aus dem spezifischen Gewicht umgekehrt proportional ist. Schwingt die Saite als Ganzes (Fig. 273 $A$), so gibt sie ihren Grundton; sie kann sich aber auch durch ruhende

Punkte (Schwingungsknoten) in 2, 3, 4 . . . schwingende Teile (Bäuche) zerlegen und gibt dann die zum Grundton harmonischen Obertöne, deren Schwingungszahlen 2-, 3-, 4- . . . mal so grofs sind als diejenige

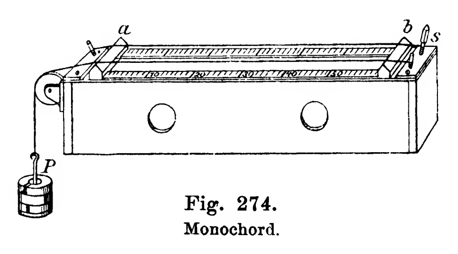



Fig. 274.
Monochord.

des Grundtones. Um die Schwingungsformen *B*, *C*, *D* (Fig. 273) hervorzurufen, berührt man die Saiten bei *m*, *n*, *p* mit einem Pinsel und streicht oder zupft bei *a*. Die Schwingungsknoten können sichtbar gemacht werden, indem man an den Knoten sowohl als an den Bäuchen Papierreiterchen aufsetzt; an diesen Punkten werden sie abgeworfen, an jenen bleiben sie sitzen.

Die Schwingungszahl $N$ des Grundtones einer Saite wird gegeben durch den Ausdruck

$$N = \frac{1}{l\,d}\sqrt{\frac{g\,S}{s\,\pi}},$$

wenn $l$ ihre Länge, $d$ die Dicke, $S$ die Spannung, $s$ das spezifische Gewicht bedeutet, und $g = 9{,}81$, $\pi = 3{,}14159$ ist (Taylorsche Formel, 1716).

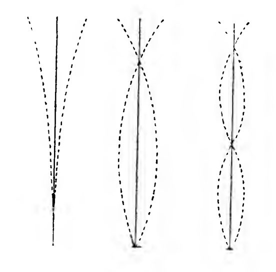


Fig. 275.
Schwingungsformen eines am einen Ende festgeklemmten Stabes.

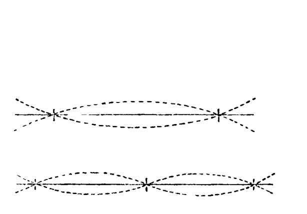


Fig. 276.
Schwingungsformen eines an beiden Enden freien Stabes.

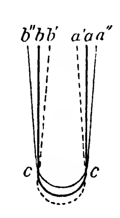



Fig. 277.
Stimmgabel.

300. **Transversalschwingungen von Stäben.** Während einer Saite die Fähigkeit, nach dem Anschlagen in ihre Gleichgewichtslage zurückzukehren, durch eine äufsere Kraft, die Spannung, mitgeteilt werden mufs, besitzen Stäbe in sich selbst schon die zum Schwingen erforderliche Elasticität. Am einen Ende eingeklemmt, ist ein Stab der in Fig. 275 dargestellten Schwingungsformen fähig, indem er entweder als Ganzes oder mit 1, 2, 3 . . . Knoten schwingt; an einem Glasfaden von geeigneter Länge, den man an einer Zinke

einer Stimmgabel befestigt, lassen sich die Schwingungsknoten leicht beobachten. Sind beide Enden frei, so besitzt der Stab in seiner einfachsten Schwingungsart bereits zwei Knoten (Fig. 276), welche etwa um $^1/_5$ der Stablänge von den Enden abstehen, und in welchen der Stab unterstützt werden mufs, um ungehindert schwingen zu können. Die Schwingungszahl eines Stabes steht im geraden Verhältnis seiner Dicke, im umgekehrten Verhältnis des Quadrats seiner Länge, ist aber unabhängig von seiner Breite. Die Obertöne, welche den höheren Schwingungsformen entsprechen, sind zum Grundton nicht harmonisch, sondern steigen viel rascher in die Höhe. Die Längen gleichdicker Stäbe, deren Grundtöne die Noten der Tonleiter geben sollen, müssen sich umgekehrt verhalten wie die Quadratwurzeln der Schwingungszahlen.

Die Schwingungszahl $N$ eines Stabes wird ausgedrückt durch

$$N = C\frac{d}{l^2}\sqrt{\frac{gE}{s}},$$

wo $E$ den Elasticitätsmodul, $s$ das spezifische Gewicht und $C$ einen konstanten Faktor bezeichnet, der von der Art der Einklemmung oder Unterstützung und von der Anzahl der Schwingungsknoten abhängig ist.

Bei einem gebogenen Stab liegen die beiden Knoten seiner Mitte näher als bei einem geraden; eine **Stimmgabel** ist ein hufeisenförmig gebogener Stab, der so stark zusammengebogen ist, dafs die beiden Schwingungsknoten (Fig. 277 *cc*) der Biegung nahe zu liegen kommen.

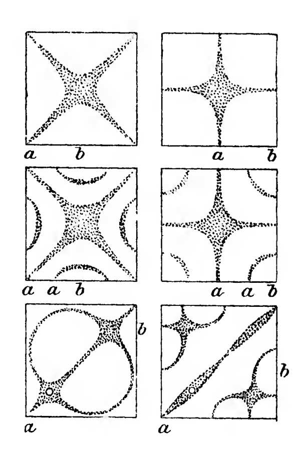



Fig. 278.
Chladnis Klangfiguren.

301. **Schwingende Platten.** Platten können sich in mannigfaltiger Weise durch Knotenlinien abteilen, wenn man sie am Rand mit dem Violinbogen streicht und gewisse Punkte derselben durch Festklemmen oder durch Berühren mit dem Finger am Schwingen hindert. Bestreut man die Platte mit Sand, so begibt sich derselbe von den schwingenden Teilen nach den ruhenden Knotenlinien und macht diese sichtbar. So entstehen die von Chladni zuerst dargestellten Klangfiguren (Fig. 278); jede entspricht einem anderen Ton der Platte, der um so höher ist, je zahlreicher die schwingenden Abteilungen der Platte sind. In der Zeichnung sind die Punkte, welche man, um die betreffende Figur zu erhalten, festhalten mufs, mit *a*, der Punkt, wo der Violinbogen anzusetzen ist, mit *b* bezeichnet. Kreisförmige Platten, in der Mitte eingeklemmt und am Rande gestrichen, teilen sich durch ruhende Durchmesser in 4, 6, 8 ... gleiche Sektoren. Zwei angrenzende Abteilungen einer Platte schwingen immer entgegengesetzt. Glocken

sind als schalenförmig gekrümmte Platten zu betrachten; beim Tönen zerlegen sie sich ebenfalls in schwingende Abteilungen, welche durch ruhende Knotenlinien voneinander getrennt sind.

Bei Platten aus demselben Material, die ähnliche Formen, aber verschiedene Dimensionen haben, sind bei gleicher Schwingungsform die Schwingungszahlen proportional den Dicken und umgekeht proportional den Flächen. Haben die Dimensionen nach allen drei Richtungen dasselbe Verhältnis, so kann man auch sagen, die Schwingungszahlen stehen im umgekehrten Verhältnis der linearen Dimensionen oder, da das Gewicht bei Platten aus demselben Stoff dem Volumen proportional ist, die Schwingungszahlen verhalten sich umgekehrt wie die Kubikwurzeln aus den Gewichten.

302. **Zungenpfeifen.** Unter einer Zunge versteht man einen elastischen Metallstreifen, der, an seinem einen Ende befestigt, nach dem Gesetz der Stäbe schwingt und durch seine Schwingungen einen Luftstrom in regelmäfsigen Zwischenräumen unterbricht. Dieser Luftstrom dringt aus dem Rohr *pp* der Zungenpfeife (Fig. 279), welche mit ihrem Fufs auf ein Gebläse aufgesetzt ist, in die halbcylinderförmige Messigrinne *rr* (Kanile), deren Schlitz von der schwingenden Zunge *l* abwechselnd geöffnet und geschlossen wird, und entweicht durch die Öffnung *v* ins Freie. Durch den Holzpropf *ss*, mit welchem das Zungenwerk auf das Rohr der Pfeife aufgesetzt ist, ist der Stimmdraht *d* gesteckt, durch dessen Niederdrücken oder Hinaufziehen man die Zunge höher oder tiefer stimmen kann. Zur Verstärkung und Abänderung des Tones kann auf die Öffnung *v* ein kegelförmiger Schalltrichter aufgesetzt werden, welcher, wenn er nur kurz ist, auf die Schwingungszahl des Grundtones der Zunge keinen merklichen Einflufs übt, bei hinreichender Länge dieselbe aber wesentlich abändert. Die Zunge ist nämlich weder so starr wie eine Stimmgabel, noch so nachgibig wie der zitternde Luftstrom, der eine gewöhnliche Pfeife zum Tönen bringt. Daher wird erst, wenn das Ansatzrohr genügend lang ist, die in ihm sich ausbildende stehende Wellenbewegung die Zunge zwingen, sich ihr anzubequemen. Eine andere Art von Zungen sind die häutigen (membranösen) Zungen; sie werden durch zwei häutige elastische Platten oder Bänder (z. B. von Kautschuk) gebildet, welche einen schmalen, zwischen ihnen befindlichen Spalt durch ihre Schwingungen abwechselnd öffnen und schliefsen und so den aus dem Spalt dringenden Luftstrom rhythmisch unterbrechen. Durch stärkere Spannung der Bänder wird die Tonhöhe gesteigert. Das menschliche Stimmorgan ist nichts anderes als eine membranöse Zungenpfeife, in welcher die zu beiden Seiten der Stimmritze ausgespannten Stimmbänder als Zungen wirken.

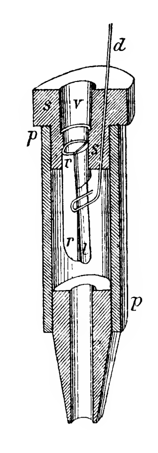


Fig. 279.
Zungenpfeife.

303. **Zusammensetzung rechtwinkliger Schwingungen.** Ein Stäbchen von rechteckigem Querschnitt, welches am einen Ende *A* befestigt ist (Fig. 280), kann sowohl in der Richtung *ab* als in der

dazu senksechten Richtung *cd* in Schwingungen versetzt werden, deren Schwingungszahlen sich verhalten wie die Dicken des Stäbchens nach diesen Richtungen. Durch einen schiefen Stoſs werden beide Schwingungsarten gleichzeitig wachgerufen, und das freie Stabende beschreibt eine krumme Linie (Fig. 281), deren Gestalt von dem Verhältnis der Schwingungszahlen abhängig ist. Sind die Schwingungszahlen einander gleich oder ist ihr Verhältnis 1 : 1, so stellt die Schwingungsfigur einen Kreis oder eine Ellipse dar; ist das Ver-

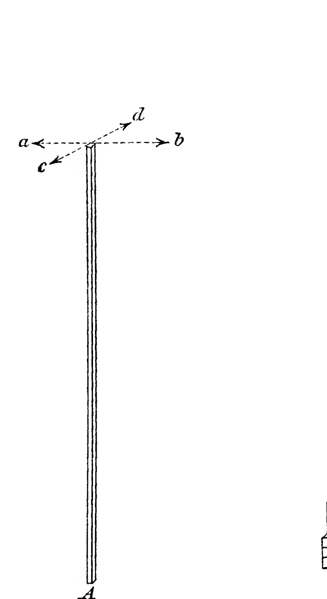



Fig. 280.
Zusammengesetzte Schwingungen eines Stäbchens.

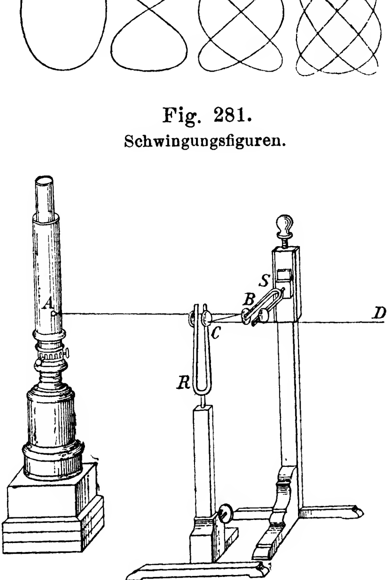



Fig. 281.
Schwingungsfiguren.

Fig. 282.
Optische Methode der Vergleichung zweier Stimmgabeln nach Lissajous.

hältnis 1 : 2 (Grundton und Oktave), so hat die Figur die Form einer 8 u. s. f. Man kann diese zierlichen Figuren sehr schön beobachten an Stäbchen, die oben glänzende Knöpfchen tragen (Wheatstones Kaleidophon, 1827). Nach einem von Lissajous (1847) angegebenen Verfahren können diese Schwingungsfiguren mittels eines Lichtstrahles auf einem Schirm entworfen werden. Zwei Stimmgabeln *R* und *S* (Fig. 282), von welchen jene lotrecht, diese wagrecht aufgestellt ist, tragen bei *C* und *B* kleine Spiegel. Der von der Lampe *A* kommende Lichtstrahl *AB* wird von *B* nach *C*, von *C* auf einen Schirm bei *D* geworfen und zeichnet hier, wenn beide Gabeln in Ruhe sind, einen Lichtpunkt. Schwingt die Gabel *R* allein, so erscheint statt des Licht-

punktes ein senkrechter, dagegen wenn *S* allein schwingt, ein wagrechter Lichtstreifen; schwingen aber beide Stimmgabeln gleichzeitig, so erblickt man eine jener krummliegenden Figuren, aus deren Gestalt auf das Schwingungsverhältnis der beiden Gabeln geschlossen werden kann.

304. **Vibrographie.** Man kann eine Stimmgabel ihre Schwingungen dauernd aufzeichnen lassen, wenn man eine ihrer Zinken mit einer Spitze (Fig. 283*r*) aus dünnem Messigblech versieht und diese Spitze, während die Stimmgabel schwingt, über eine berufste Glasplatte hinführt, oder wenn man einen berufsten Cylinder (Fig. 283 *TT*), welcher sich während der Drehung vermöge des Schraubengewindes *Ab* in der Richtung seiner Achse langsam verschiebt, vor der fest auf-

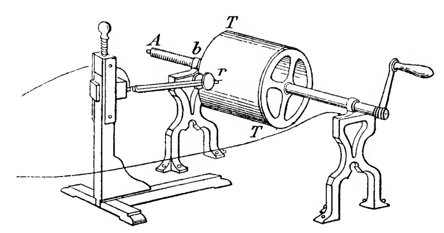



Fig. 283.
Phonautograph.

gestellten Stimmgabel dreht. Die Schreibspitze zeichnet eine Wellenlinie (Fig. 284) in den Rufs, welche der treue Ausdruck für das Bewegungsgesetz der Stimmgabel ist. Sie ist eine Sinuskurve, und zeigt dadurch, dafs die Schwingungen einer Stimmgabel nach demselben Gesetze wie diejenigen eines Pendels erfolgen. Diese Vorrichtung, welche Phonautograph genannt wird, gestattet, die Schwingungszahl einer Stimmgabel genau zu bestimmen; man führt nämlich von dem Gestell des Cylinders und vom Fufs der Gabel

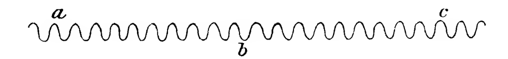



Fig. 284.
Wellenlinie von einer Stimmgabel gezeichnet.

Drähte nach einem Induktionsapparat und schaltet in diese Leitung ein Sekundenpendel derart ein, dafs es bei jedem Hin- und Hergang den elektrischen Strom auf einen Augenblick schliefst; in diesem Augenblick springt von der Schreibspitze ein Fünkchen auf den Cylinder und hinterläfst auf der gezeichneten Wellenlinie eine Marke (Fig. 284*abc*); mann kann nun leicht zählen, wieviel Schwingungen die Stimmgabel während einer Sekunde gemacht hat. Ist die Schwingungszahl der Gabel bekannt, so kann die Anzahl der zwischen zwei Marken enthaltenen Wellen zur genauen Messung des kleinen Zeitraumes dienen, welcher zwischen der Hervorbringung der beiden Marken verflossen ist (Stimmgabelchronoskop, Vibrations-

chronoskop). Um auch Luftwellen mittels des Phonautographen aufzuzeichnen, wird ein Schalltrichter vor dem berufsten Cylinder aufgestellt, dessen verengtes Ende mit einer elastischen Haut überzogen ist, die ein leichtes, die Rufsfläche sanft berührendes Schreibstielchen trägt (Phonautograph von Scott und Rud. König, 1859).

305. **Interferenz der Schallwellen.** Zwei Schallwellen von gleicher Tonhöhe und gleicher Stärke können sich durch ihr Zusammenwirken (Interferenz) gegenseitig aufheben, d. h. Stille erzeugen, wenn sie mit einem Gangunterschied von einer halben Wellenlänge zusammentreffen. Dies beobachtet man z. B. bei zwei gleichgestimmten auf denselben Windkasten gesetzten Pfeifen; die Luftbewegung in denselben regelt sich alsdann so, dafs, wenn in dem Schwingungsknoten der einen eine Verdichtung eintritt, gleichzeitig in dem der anderen eine Verdünnung stattfindet; ein etwas entferntes Ohr empfängt daher gleichzeitig eine Verdichtungs- und eine Verdünnungswelle und vernimmt den Grundton der Pfeifen nicht, wohl aber die Obertöne, für welche ein solcher Gegensatz der Bewegungen nicht stattfindet.

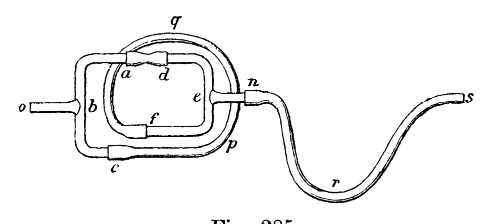



Fig. 285.
Interferenz des Schalles.

Fig. 285 stellt eine Vorrichtung (Quincke) dar, welche dazu bestimmt ist, den Ton einer Stimmgabel durch Interferenz auszulöschen; zwei gabelförmige Glasröhrenstücke *obac* und *nedf* sind einerseits durch einen kurzen (*ad*), andererseits durch einen längeren Kautschukschlauch *fqpc* miteinander verbunden; wird das Ende *o* des Apparats in das Ohr eingesetzt, so hört man eine vor das offene Ende des Kautschukschlauches *nrs* gebrachte Stimmgabel nicht, wenn das Schlauchstück *fqpc* gleich einer halben Wellenlänge des Stimmgabeltones ist; man hört dagegen den Ton, wenn man dieses Stück mit den Fingern zudrückt.

306. **Schwebungen.** Klingen zwei Töne zusammen, deren Schwingungszahlen nur wenig voneinander abweichen, so vernimmt man abwechselnde Anschwellungen und Senkungen der Tonstärke, welche man Schwebungen oder Stöfse nennt. Tönen z. B. zwei Stimmgabeln zusammen, deren eine 512, die andere 508 Schwingungen in einer Sekunde macht und befinden sich in irgend einem Augenblick ihre Bewegungen derart in Übereinstimmung, dafs beide gleichzeitig eine Verdichtungswelle ins Ohr senden, so empfängt dieses einen verstärkten Eindruck. Dasselbe wiederholt sich je nach $^1/_4$ Sekunde, da in dieser Zeit die erste Gabel 128, die zweite 127 ganze Schwin-

gungen vollendet; nach $^1/_8$ Sekunde dagegen hat jene 64, diese nur $63^1/_2$ Schwingungen gemacht, letztere ist also um eine halbe Schwingung gegen erstere zurückgeblieben und sendet eine Verdünnungswelle ins Ohr, welche die von der ersteren gleichzeitig ausgehende Verdichtungswelle aufhebt. Man hört also in einer Sekunde 4 Schwebungen, nämlich so viele, wie der Unterschied der Schwingungszahlen ausmacht. Erfolgen mehr als 30 Stöſse in der Sekunde, so kann man sie nicht mehr gut einzeln wahrnehmen; sie bringen aber in ihrer Gesamtheit eine für das Ohr unangenehme Rauhigkeit in den Zusammenklang, welche die Hauptursache der Dissonanz ist. Mit Hilfe der Schwebungen kann man sehr leicht, auch ohne geübtes Gehör, zwei Saiten, Pfeifen etc. vollkommen gleich stimmen, weil sich die Annäherung an den Gleichklang durch immer langsamer erfolgende Stöſse kundgibt. Eine Reihe von Stimmgabeln oder Zungen, deren jede mit den folgenden Schwebungen, z. B. vier in der Sekunde, gibt, kann als Tonmesser dazu dienen, die Schwingungszahlen von Tönen, die im Bereiche der Reihe liegen, zu bestimmen.

307. **Kombinationstöne.** Beim Zusammenklingen zweier kräftiger Töne, deren Tonhöhen nicht so nahe beisammen liegen, daſs Stöſse unterschieden werden könnten, hört man einen dritten, tieferen Ton, dessen Schwingungszahl gleich dem Unterschied der Schwingungszahlen jener beiden Töne ist; derselbe wird Kombinationston, Tartinischer Ton oder nach Helmholtz Differenzton genannt. Man hört z. B. die nächst tiefere Oktave eines Tones, wenn gleichzeitig seine Quinte erklingt.

308. **Resonanz** nennt man das Mittönen eines Körpers beim Erklingen des ihm eigentümlichen Tones. Ein Beispiel davon haben wir schon kennen gelernt (296) in dem Mitklingen einer in eine Röhre eingeschlossenen Luftsäule mit einer Stimmgabel, welche denselben Ton gibt, den jene beim Anblasen geben würde.

Wird von zwei nebeneinander aufgespannten Saiten die eine angeschlagen, so tönt auch die andere mit, wenn beide gleich gestimmt sind; sie bleibt dagegen stumm, wenn sie in ihrer Stimmung auch nur ein wenig von jener abweicht. Die angeschlagene Saite sendet nämlich Schallwellen aus, welche, an der ruhenden Saite anlangend, diese in Bewegung zu setzen suchen. Erfolgt der Wellenschlag in gleichem Tempo wie die Schwingungen, deren die Saite fähig ist, d. h. sind beide Saiten gleich gestimmt, so erhält die Saite, wenn sie vorwärts zu gehen im Begriff ist, einen Stoſs nach vorwärts und während sie zurückgeht, einen Stoſs nach rückwärts. Die folgenden Stöſse wirken in dieser Weise unausgesetzt zur Verstärkung der Bewegung, welche durch den ersten nur schwach eingeleitet worden ist, und die Saite gerät in so lebhafte Schwingungen, daſs auf sie gesetzte Papierreiterchen abgeworfen werden. Ist dagegen die Schwingungszahl der ankommenden Welle von derjenigen der Saite verschieden, so geraten die späteren Stöſse sehr bald in Widerstreit mit der durch die früheren hervorgebrachten leisen Erzitterung und

heben deren Wirkung wieder auf, so dafs die Saite in Ruhe bleibt. Die Töne von Saiten werden bekanntlich erst dann kräftig hörbar, wenn letztere über einem hölzernen Resonanzboden oder Resonanzkasten (Fig. 274) ausgespannt sind. Die elastischen Fasern des Holzes sowie die in dem Kasten enthaltene Luft verstärken nämlich durch ihr Mitklingen den an sich nur leisen Ton der Saiten. Der Wert eines Saiteninstruments ist wesentlich von der Güte seines Resonanzbodens abhängig. Auch Stimmgabeln, die ebenfalls für sich nur schwach klingen, befestigt man auf einerseits geschlossenen Holzkästen, deren Länge gleich einer Viertelwelle des Stimmgabeltones ist, so dafs auch noch die Luft im Kasten wie in einer gedeckten Pfeife mitschwingt. Bringt man die eine von zwei einander gegenüberstehenden genau gleichgestimmten Gabeln zum Tönen und alsbald durch Berührung mit der Hand wieder zum Schweigen, so tönt die andere fort, und stöfst ein Elfenbeinkügelchen, das in Berührung mit einer ihrer Zinken aufgehängt ist, von sich ab.

309. **Klangfarbe.** Die Klänge unterscheiden sich aufser durch ihre Tonhöhe und Stärke auch noch durch ihre Klangfarbe (timbre); man bezeichnet mit diesem Ausdruck den eigentümlichen

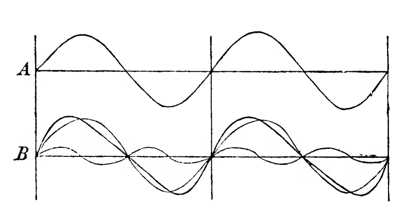



Fig. 286.
Schwingungsformen.

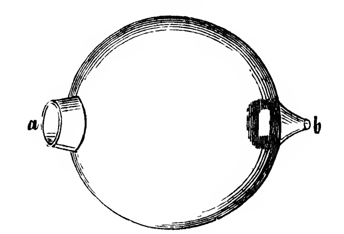



Fig. 287.
Resonator.

Charakter, den ein und dieselbe Note besitzt, je nachdem sie durch die Violine, Klarinette, das Piano, die menschliche Stimme etc. wiedergegeben wird. Während die Stärke eines Klanges nur von der Weite (Amplitude) seiner Schwingungen abhängig und dem Quadrat derselben proportional ist (53), die Höhe aber nur von der Schwingungszahl abhängt, ist die Klangfarbe durch die Schwingungsform bedingt. Die Schwingungsform findet ihren Ausdruck in der Gestalt der Wellenlinie, durch welche sich das Gesetz der durch den tönenden Körper erzeugten Verdichtungen und Verdünnungen (etwa mittels des Phonautographen) darstellen läfst. In Fig. 286 *A* und *B* stellen die stark ausgezogenen Wellenlinien zwei Schallbewegungen von gleicher Tonhöhe, aber verschiedener Schwingungsform dar: die erstere entspricht der einfachen, nach dem Pendelgesetz erfolgenden Bewegung einer Stimmgabel; die letztere ist aus zwei durch die schwach ausgezogenen Wellenlinien angedeuteten pendelartigen Bewegungen, dem Grundton und der Oktave, zusammen-

gesetzt; die an jeder Stelle von den beiden Wellen einzeln hervorgebrachten Verschiebungen fügen sich zu einander, indem die längere Welle die kürzere gleichsam auf ihren Rücken nimmt, und bringen dadurch eine neue, durch die stark ausgezogene Linie dargestellte Wellenform hervor, welche zwar selbst nicht mehr dem Pendelgesetz entspricht, in welcher aber zwei pendelartige Schwingungen innig miteinander verschmolzen sind. In dieser Weise läfst sich jede nicht pendelartige Schwingungsbewegung aus solchen einfachen pendelartigen Schwingungen zusammengesetzt oder in dieselben zerlegt denken (Fourier), deren Schwingungszahlen sich wie die Zahlen der natürlichen Reihe 1, 2, 3, 4 . . . verhalten. Diese Zerlegung ist aber

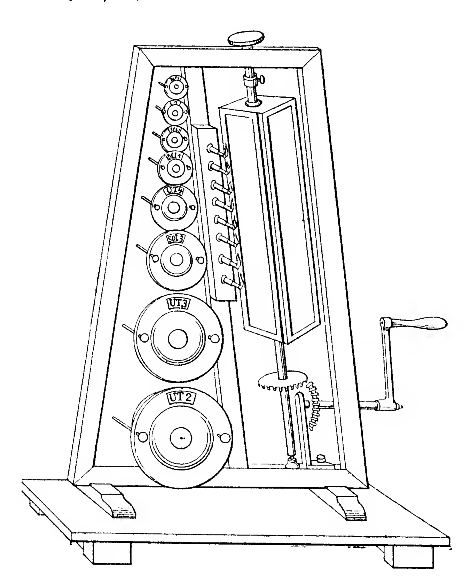



Fig. 288.
Klanganalysator.

nicht blofs eine gedachte, sondern sie wird von unserem Ohr in der That unbewufst vorgenommen. Denn nach einem von G. S. Ohm zuerst aufgestellten Satz empfindet das Ohr nur eine pendelartige Schwingung der Luft als einfachen Ton und zerlegt jede andere schwingende Bewegung in pendelartige Schwingungen, welche als eine Reihe einfacher Töne aus dem zusammengesetzten Klang herausgehört werden. Der tiefste in einem Klang enthaltene einfache Ton heifst sein Grundton, die höheren die Obertöne (Teiltöne, Partialtöne). Die grofse Mannigfaltigkeit der Klangfarben ist nun dadurch bedingt, dafs sich zu dem Grundton bald diese, bald jene seiner Obertöne mit gröfserer oder geringerer Stärke hinzugesellen. Um das Ohr, welches durch Gewohnheit leicht geneigt ist, jeden Klang als ein einheitliches Ganze aufzufassen, in der Wahr-

nehmung der einfachen Teiltöne zu unterstützen, dienen die von Helmholtz angegebenen Resonatoren (Fig. 287), nämlich gläserne oder messingene Hohlkugeln, deren eine Öffnung *a* der Schallquelle zugekehrt ist, während die andere kegelförmig gestaltete *b* in das Ohr eingesetzt wird. Jeder Resonator verstärkt nur denjenigen einfachen Ton, auf welchen die in ihm enthaltene Luftmasse abgestimmt ist, und befähigt so das mit ihm bewaffnete Ohr, diesen Ton aus einem Tongemisch oder Klang deutlich herauszuhören. Durch eine Reihe auf einen Grundton und die zugehörigen Obertöne abgestimmter Resonatoren vermag man daher die Zusammensetzung eines Klanges von gleichem Grundton zu erforschen, indem man ihn in seine einfachen Teiltöne zerlegt. Diese Klanganalyse kann sogar für das Auge sichtbar durchgeführt werden mittels Rud. Königs Klanganalysator (Fig. 288); acht Resonatoren sind übereinander auf einem Gestell befestigt, die hintere Öffnung eines jeden steht durch einen Kautschukschlauch mit einer manometrischen Kapsel (s. oben Fig. 269) in Verbindung. Die Gasflammen dieser Kapseln sind seitwärts längs einer geneigten Linie übereinander angebracht und werden in einem drehbaren Spiegel betrachtet. Diejenigen Flammen, deren Resonatoren durch den zu untersuchenden Klang in Thätigkeit gesetzt werden, geben im Spiegel eine Reihe getrennter Flammenbilder; jene dagegen, auf deren Resonatoren jener Klang nicht einwirkt, erscheinen in der Form eines ununterbrochenen hellen Streifens.

Sind tönende Körper, wie Saiten, Pfeifen etc. geneigt, sich durch Knoten abzuteilen, so geben sie, in Schwingungen versetzt, gleichzeitig mit dem Grundton auch alle Obertöne, welche nicht etwa durch die Art der Anregung sich zu bilden gehindert sind. Zupft man z. B. eine Saite an einer Stelle, die um $^1/_7$ ihrer Länge vom einen Ende entfernt ist, und berührt sie in der Mitte mit einem Pinsel, so schweigt der Grundton, und man hört dessen Oktave; berührt man sie ebenso in Punkten, die um $^1/_3$, $^1/_4$, $^1/_5$, $^1/_6$ vom anderen Ende abstehen, so hört man der Reihe nach die Quinte dieser Oktave (die Duodecime), die Doppeloktave, dann die Terz und die Quinte der letzteren. Der in den gebräuchlichen Tonleitern nicht vorkommende Teilton von der Ordnungszahl 7 dagegen konnte nicht zustande kommen, weil die Saite gerade dort gezupft wurde, wo er einen Knoten haben sollte. Indem jene harmonischen Obertöne mit dem Grundtone gleichzeitig erklingen und sich ihm beimischen, entsteht die reiche und prächtige Klangfarbe, welche die Saiten für die Musik so wertvoll macht. Mischen sich, wie bei gestrichenen Saiten, auch noch höhere Teiltöne hinzu, so wird der Klang zwar rauher und schärfer, gewinnt aber noch an Ausdrucksfähigkeit. Die offenen Pfeifen geben dieselbe Reihe harmonischer Obertöne, jedoch vorzugsweise die niedrigeren. Sind, wie bei gedeckten Pfeifen, nur ungeradzahlige Obertöne vorhanden, so erscheint der Klang dumpf und hohl. Einfache Töne, wie diejenigen von Stimmgabeln, klingen angenehm und weich, aber leer und ausdruckslos, und sind daher zu

musikalischen Zwecken kaum brauchbar. Noch weniger musikalisch sind die klirrenden Klänge von Stäben und Platten, deren Grundton von hohen unharmonischen Obertönen begleitet ist. Die Konsonanz zweier Klänge ist um so vollkommener, je mehr gemeinschaftliche Teiltöne sie enthalten (Helmholtz, 1865).

310. **Vokale.** Die menschliche Stimme entsteht durch die Schwingungen der beiden Stimmbänder, welche im Kehlkopf von vorn nach hinten ausgespannt sind und so die Ränder einer schmalen Spalte, der Stimmritze, bilden. Durch die Schwingungen der Stimmbänder wird die Stimmritze abwechselnd geöffnet und geschlossen und durch diese regelmäſsige Unterbrechung des aus der Luftröhre dringenden Luftstromes ein Klang erzeugt, der um so höher ist, je stärker die Stimmbänder durch die Einwirkung gewisser unserem Willen gehorchender Muskeln gespannt werden. Dieser Klang ist sehr reich an Obertönen. Je nach der Gröſse und Gestalt, welche man der Mundhöhle gibt, können wir einen oder mehrere von diesen Obertönen besonders zur Geltung bringen und so die Klangfarbe der Stimme mannigfach abändern; die Mundhöhle wirkt nämlich als Resonator, indem sie durch Mitklingen der in ihr enthaltenen Luft denjenigen Oberton verstärkt, auf welchen sie jedesmal abgestimmt ist. Auf den so hervorgebrachten Abänderungen der Klangfarbe beruhen die Unterschiede der Vokale. Während beim *u* fast nur der reine Grundton gehört wird, gesellt sich beim *o* zum Grundton noch dessen Oktave, und bei *a*, *e* und *i* sind noch höhere Obertöne beigemischt. Da aber die Mundhöhle für jeden Vokal eine bestimmte Form annimmt, der Verstärkungstöne von ganz bestimmter Tonhöhe zukommen, so ist der Charakter der Vokale nicht bloſs durch das Stärkeverhältnis der Obertöne zum Grundton, sondern auch durch eine bestimmte absolute Tonlage bestimmt. Bringt man die Mundhöhle abwechselnd in die Stellung, welche den Vokalen *a* und *o* zukommt, indem man diese Laute nacheinander leise ausspricht, und hält eine angeschlagene Stimmgabel, deren Ton $b_1$ ist, vor den Mund, so wird die in der Mundhöhle enthaltene Luft bei dem *o* kräftig mitklingen, bei dem *a* dagegen stumm bleiben; ist dagegen die Stimmgabel auf $b_2$ gestimmt, so erfolgt das Mittönen bei *a*, nicht aber bei *o*. Demnach ist $b_1$ der für *o*, $b_2$ der für *a* charakteristische Eigenton. Es erklärt sich hieraus die Schwierigkeit, die dumpfen tiefen Vokale *a* und *o* auf sehr hohe, oder die hellen hohen Vokale auf sehr tiefe Töne ohne Veränderung ihres Vokalcharakters zu singen.

Spricht man mit gleichbleibender Stimmlage die Vokale durch einen Schalltrichter gegen die Membran einer manometrischen Flamme, so erkennt man im Drehspiegel an den gezackten Lichtstreifen die Unterschiede in der Zusammensetzung der Vokalklänge.

Die Konsonannten sind kurzdauernde Geräusche, welche mit Lippen, Zunge, Gaumen hervorgebracht werden.

311. **Phonograph. Grammophon.** Durch den Phonograph von Edison (1877) lassen sich die Laute der menschlichen Sprache und

beliebige andere Klänge dauernd aufzeichnen und nach beliebiger Frist wiedergeben. Eine Messingwalze *C* (Fig. 289) wird von einer Achse *AA'* getragen, in deren eine Hälfte *A'* ein Schraubengewinde eingeschnitten ist, dem das eine Achsenlager als Mutter dient. Auf der Oberfläche der Walze ist eine schraubenförmige Rinne von derselben Steigung wie die Schraube *A'* eingegraben. Die Walze wird mit einem dünnen Stanniolblatt oder bei den späteren verbesserten Apparaten mit einer abnehmbaren Wachsschicht überzogen und ist nun zum Empfang der Zeichen bereit. Der zeichengebende Teil

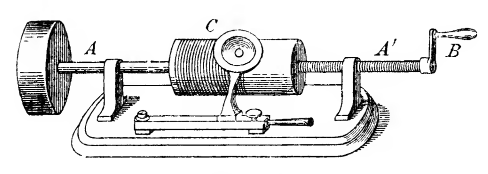



**Fig. 289.**
**Phonograph.**

besteht aus einem mit einem Schallbecher versehenen Mundstück *D* (Fig. 290), in dem eine dünne Platte *E* gleich einem Trommelfell ausgespannt ist, welche einen von einer Metallfeder getragenen Stift *G* durch Vermittelung der Dämpfer *FF* (Stücke von Kautschukschläuchen) gegen die Walze drückt, so dafs der ruhende Stift, wenn die Kurbel *B* gedreht wird, eine der Rinne der Walze folgende Schraubenlinie beschreiben würde. Spricht man nun in das Mundstück, während die Walze gleichmäfsig gedreht wird, so schwingt die Platte, und der Stift bringt auf dem Stanniolblatt oder der Wachsschicht Eindrücke hervor, deren Profil die Schwingungsform der gesprochenen Laute nachahmt. Um diese Laute wieder hervorzubringen, schlägt man den Zeichengeber zurück, dreht die Walze rückwärts und bringt Stift und Mundstück wieder in die anfängliche Lage. Dreht man jetzt die Kurbel wie anfangs, so versetzt der Stift, indem er über die Eindrücke des Stanniolblattes hinweggleitet, die Platte in Schwingungen, welche denjenigen, die sie vorher beim Aufzeichnen gemacht hatte, entsprechen. Der Apparat gibt auf diese Weise die gesprochenen Worte in ähnlicher Klangfarbe mehr oder weniger deutlich wieder.

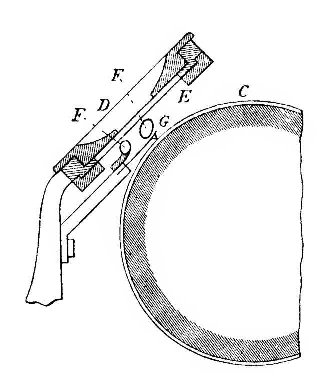



**Fig. 290.**
Zum Phonograph.

Beim Grammophon (Berliner, 1888) werden durch eine vertikal stehende, in der Mitte mit Schreibstift versehene Membran die mittels Schalltrichters aufgefangenen Schallwellen als spiralförmige Wellen-

linien auf eine horizontale Metallscheibe in einen Ätzgrund eingezeichnet und sodann eingeätzt; die so erhaltenen Platten lassen sich beliebig vervielfältigen. Zur Wiedergabe der Töne (Sprache, Tierstimmen, Musikstücke etc.) wird der Stift einer vertikalen Membran beim Drehen der Scheibe in der vertieften Wellenlinie geführt und versetzt die Membran in entsprechende Schwingungen, welche die ursprünglichen Laute deutlich und beliebig oft wiederholen.

312. **Gehör.** Der äufsere Gehörgang ist an seinem inneren Ende durch eine schwingungsfähige Membran, das Trommelfell, abgeschlossen, von welchem aus die Reihe der Gehörknöchelchen (Hammer, Ambofs und Steigbügel) die Schwingungen durch die Paukenhöhle hindurch auf die im Labyrinth enthaltene Flüssigkeit überträgt. Diese Vorrichtung hat den Nutzen, dafs die Schallbewegung zunächst von einer relativ grofsen Fläche, dem Trommelfell, aufgefangen und von dieser durch die Gehörknöchelchen auf die 15—20 mal kleinere Fläche des ovalen Fensters, das in das innere Ohr hineinführt, gewissermafsen konzentrirt wird, und dafs dabei die Gehörknöchelchen als eine hebelartige Kombination wirken, welche die Bewegung von grofser Amplitude und geringer Kraft, wie sie das Trommelfell ausführt, in eine solche von geringer Amplitude und grofser Kraft verwandeln, wie sie erforderlich ist, um das Labyrinthwasser zum Mitschwingen anzuregen. Das Labyrinth besteht aus dem Vorhof, den halbkreisförmigen Kanälen und der Schnecke. In seiner knöchernen Wandung befinden sich zwei mit Membranen verschlossene Öffnungen, das runde und ovale Fenster. Auf die Membran des ovalen Fensters ist der Steigbügel mit seiner Fufsplatte aufgewachsen. In der Schnecke ist in ihrer ganzen Längserstreckung eine feine Scheidewand, die Basilarmembran, ausgespannt. Sie besteht aus 15—20000 feinen Fasern, die in radialer Anordnung nebeneinander liegen, und von der Basis der Schnecke bis zu ihrer Spitze an Länge zunehmen. Mit diesen, den Saiten einer Harfe ähnlichen Fasern sind die feinen Endigungen des Hörnerven unter Vermittelung eines komplicirten Zwischengliedes, des sog. Cortischen Organes, verbunden. Auf bestimmte einfache Töne sprechen bestimmte Fasern der Basilarmembran an und erregen durch Reizung der ihnen zugeordneten Nervenendigungen die diesen einfachen Schwingungsvorgängen entsprechenden Tonempfindungen.

---

# X. Licht.

## (Optik.)

---

313. **Licht. Lichtquellen.** Jeder auf den Sehnerv, der sich als „Netzhaut“ im Hintergrund unseres Auges ausbreitet, ausgeübte Reiz ruft in unserem Bewufstsein die Empfindung der Helligkeit hervor, von welcher Art dieser Reiz übrigens auch sein mag. Einen Schlag oder Druck auf das Auge, die Änderungen eines hindurchgeleiteten galvanischen Stromes, ja selbst die Bewegung des Blutes in den die Netzhaut ernährenden Gefäfsen empfinden wir als Helligkeit.

Wenn ein aufser uns befindlicher Gegenstand durch das Auge wahrgenommen oder gesehen wird, so kann dies nur dadurch geschehen, dafs ein gewisses Etwas von ihm ausgeht, bis zur Netzhaut dringt und dieselbe reizt. Dieses Etwas, die Ursache der Sichtbarkeit der Gegenstände, nennen wir Licht.

Körper, welche selbstthätig Licht aussenden, wie die Sonne, die Fixsterne, Flammen, glühende feste Körper, heifsen Selbstleuchter oder Lichtquellen.

Die künstlichen Lichtquellen gründen sich auf die Lichtentwickelung beim Glühen fester Körper. Eine gewöhnliche Gasflamme verdankt (wie auch jede Kerzen- und Lampenflamme) ihre Leuchtkraft feinen Kohlenteilchen, welche im Innern der glühenden Gasmasse weifsglühend schweben und erst am Rande der Gasflamme, mit dem Sauerstoff der Luft in Berührung kommend, zu Kohlensäure verbrennen. Man kann sich von dem Dasein dieser Kohlenteilchen leicht überzeugen, wenn man einen kalten Körper in die Flamme hält; an diesem setzen sich jene zarten Kohlenteilchen als Rufs ab. Bei der Bunsenschen Flamme mischt sich das durch eine kleine Öffnung einströmende Leuchtgas in der Röhre des Brenners mit der durch eine seitliche Öffnung nachgesaugten Luft. Die Bunsensche Flamme enthält daher den zur Verbrennung des Kohlenstoffs erforderlichen Sauerstoff schon in ihrem Innern; der Kohlenstoff verbrennt deshalb, ehe er sich abzuscheiden vermag, sofort zu gasförmiger Kohlensäure. Die Flamme besteht sonach nur aus glühenden Gasen, welche eine weit geringere Leuchtkraft besitzen als glühende feste Teilchen. Sie sendet daher nur ein schwaches bläulichgrünes Licht aus, dagegen entwickelt sie infolge der vollständigen Verbrennung eine bedeutend gröfsere Hitze als eine gewöhnliche Gasflamme und setzt keinen Rufs ab. Beim Gasglühlicht (Auer von Welsbach) wird die Hitze eines nichtleuchtenden Bunsenschen Brenners benutzt, um ein mit unverbrennlichen Erden (Ceroxyd, Thoroxyd) getränktes Gewebe, den „Auerstrumpf“, zu hellster Weifsglut zu erhitzen.

Ein sehr helles weifses Licht liefert ein Stück Kalk, das durch

eine mit Sauerstoffgas gespeiste Leuchtgasflamme zur Weißglut erhitzt wird (Drummondsches Kalklicht, 1826). Um dieses Licht bequem zu erzeugen, bedient man sich der Kalklampe. Die Flamme spielt schief aufwärts gegen den von einem verstellbaren Halter getragenen Kalkstift aus dem knieförmig gebogenen Rohr des Brenners. Dieser besteht aus zwei ineinander steckenden Röhren, von denen die innere den Sauerstoff von einem Gasometer her in die Flamme des Leuchtgases führt, welches aus dem zwischen beiden Röhren befindlichen ringförmigen Zwischenraum ausströmt.

Das Magnesiumlicht wird erzeugt durch Verbrennung von Magnesium. Dieses silberglänzende Metall wird in Form eines Bandes in einer zu diesem Zweck eigens gebauten Lampe durch ein Uhrwerk zwischen zwei kleinen Walzen fortgezogen und einer Weingeistflamme zugeführt, in welcher es unter Ausstoßsung eines dichten weißsen Rauchs mit blendendweißsem Licht zu festem Magnesiumoxyd verbrennt.

Auch die elektrischen Lichtquellen beruhen auf dem Glühen fester Substanz. Ein in luftleerer Glashülle durch den elektrischen Strom zum Glühen erhitzter Kohlenfaden liefert das elektrische Glühlicht (235), die weißsglühenden Kohlenspitzen, zwischen welchen der Strom im Flammenbogen übergeht, das elektrische Bogenlicht (236), die mächtigste aller künstlichen Lichtquellen.

314. **Nichtleuchter. Diffuse Zurückwerfung.** Nichtleuchtende (dunkle) Körper können nur gesehen werden, indem sie Licht, welches ihnen von Selbstleuchtern zugesendet worden, an ihrer rauhen Oberfläche nach allen vor der Oberfläche denkbaren Richtungen durch diffuse Zurückwerfung (Zerstreuung, Diffusion des Lichts) zurücksenden. Ein in dieser Weise beleuchteter Körper spielt selbst die Rolle einer Lichtquelle; er leuchtet mit erborgtem Licht. In diesem Fall befinden sich unter den Himmelskörpern der Mond und die Planeten, welche von der Sonne beleuchtet werden, sowie die Gegenstände unserer irdischen Umgebung. Das allseitig zerstreute Sonnenlicht, welches von den Wolken, den Luftteilchen und den Gegenständen der Erdoberfläche zurückgestrahlt wird, bedingt nicht nur die allgemeine Tageshelle, sondern macht auch unsere Erde, so gut wie die übrigen Planeten, zu einem lichtstrahlenden Gestirn; der fahle Lichtschimmer, welcher uns, wenn der Mond die Gestalt einer schmalen Sichel hat, auch den von der Sonne nicht direkt erleuchteten Teil seiner Scheibe sichtbar werden läßst, das sog. „aschfarbene Licht“, ist nichts anderes als der Widerschein des von der Sonne beleuchteten Erdballs.

315. **Durchsichtigkeit.** Körper, welche, wie Luft, Wasser, Glas u. s. w., dem Lichte den Durchgang verstatten, nennt man durchsichtig; man nennt sie durchscheinend, wenn sie, wie Horn, Milchglas, das Licht beim Durchgang zerstreuen, so daßs man durch sie hindurch nicht die Gegenstände, sondern nur die Helligkeit, den Schein des Lichtes wahrnehmen kann; man nennt sie undurchsichtig, wenn sie gar kein Licht durchlassen. Diese Unterscheidung beruht jedoch nicht auf einem absolut entgegengesetzten Verhalten. Denn

man kann einerseits die undurchsichtigsten aller Körper, die Metalle, in so dünnen Schichten herstellen, dafs sie gedämpftes Licht durchschimmern lassen, während andererseits durchsichtige Körper um so weniger Licht durchlassen, in je gröfserer Dicke sie zur Wirkung kommen. In bedeutenden Meerestiefen herrscht nächtliches Dunkel, weil durch die mehrere Kilometer dicke Wasserschicht nur spärliches Licht zu dringen vermag.

316. **Geradlinige Fortpflanzung. Schatten.** Ein undurchsichtiger Körper wird von einem leuchtenden Punkte nur auf seiner vorderen, der Lichtquelle zugewendeten Seite beleuchtet; seine hintere Seite, sowie ein an dieselbe sich schliefsender Raum, der Schatten, bleibt dunkel. Auf einer in den Schattenraum gebrachten Fläche entwirft sich in scharfen Umrissen als gleichförmig dunkler Fleck der Schlagschatten des Körpers. Man überzeugt sich leicht, dafs jede gerade




Fig. 291.
Schatten.

Linie, welche man sich vom leuchtenden Punkt nach einem Punkte des Schlagschattens gezogen denkt, auf ihrem Wege dem undurchsichtigen Körper als Hindernis begegnet, und dafs nur jene Punkte des Schirmes Licht empfangen, die so liegen, dafs die vom leuchtenden Punkt nach ihnen gezogenen geraden Linien neben dem schattenwerfenden Körper frei vorbeigehen.

Wir drücken diese Thatsachen auch so aus, dafs wir sagen: das Licht breitet sich (in einem gleichartigen Mittel) von einem

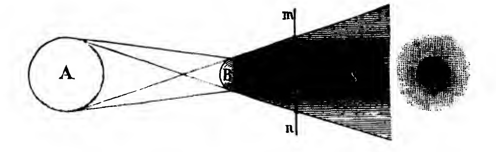



Fig. 292.
Kern- und Halbschatten.

leuchtenden Punkte in geraden Linien aus, welche man Lichtstrahlen nennt.

Ist die Lichtquelle, wie bisher angenommen, ein Punkt, so bildet der Schatten (Fig. 291) einen nach hinten sich erweiternden Kegel, welcher von den Strahlen begrenzt wird, die vom leuchtenden Punkt aus an dem schattenwerfenden Körper, diesen berührend, hinstreifen; die Berührungspunkte bilden rings um den Körper eine Linie, die Schattengrenze, welche die vordere beleuchtete Seite des Körpers von der hintern dunklen Seite trennt. Hat man zwei Lichtpunkte, so überdecken sich die Schattenkegel für einen gewissen Raum; dieser hat voll-

kommenen Schatten, Kernschatten. Die anderen Teile der Schattenkegel haben Schatten nur für je einen Lichtpunkt und werden Halbschatten genannt. Kommt das Licht von einem hellen Körper (*A*, Fig. 292), der unzählig viele Lichtpunkte enthält, so hat man, um die Beschaffenheit des Schattens kennen zu lernen, für jeden Lichtpunkt, der Licht nach dem dunklen Körper *B* sendet, den Schattenkegel in Gedanken zu entwerfen; derjenige Raum hinter dem undurchsichtigen Körper, welcher allen diesen Kegeln gemeinschaftlich ist, empfängt gar kein Licht und ist der Kernschatten (*BS*); derselbe ist umschlossen von einem nach hinten sich erweiternden Raum, der immer noch von einem Teil der Lichtpunkte Strahlen empfängt und somit teilweise erleuchtet ist, dem Halbschatten. Auf einer bei *mn* in den Schattenraum gehaltenen Ebene entsteht das in der Figur seitwärts dargestellte Schattenbild, der Schlagschatten; ein völlig dunkler Fleck, dem Kernschatten entsprechend, ist umgeben von einem weniger dunklen Hof, dessen Dunkelheit nach aufsen hin stetig abnimmt und am Rand allmählich in die volle Beleuchtung übergeht. Der Schlagschatten ist um so schärfer, je näher dem schattenwerfenden Körper derselbe aufgefangen wird, weil die Breite des verwaschenen Halbschattens um so geringer wird, je mehr man sich dem beschattenden Körper nähert. Sind beide Körper kugelförmig, so ist der Kernschatten umgrenzt von einem beide Kugeln berührenden Kegel, dessen Spitze aufserhalb des Zwischenraumes der beiden Kugeln, der Halbschatten von einem solchen Kegel, dessen Spitze innerhalb dieses Zwischenraumes liegt. Ist die Lichtquelle *A* gröfser als das Lichthemmnis *B*, wie in der Figur, so bildet der Kernschatten einen nach hinten sich verengernden in eine Spitze *S* auslaufenden Kegel, wie das z. B. bei der Beleuchtung der Planeten durch die Sonne der Fall ist. Der Kernschatten hinter dem Monde kommt dem Halbmesser der Mondbahn nahezu gleich, und kann daher, wenn der Mond zwischen Sonne und Erde tritt, was zur Zeit des Neumondes zuweilen vorkommt, mit seiner Spitze die Erdoberfläche erreichen. Für diejenigen Orte, welche von dem Kernschatten getroffen werden, findet alsdann eine vollständige Verdeckung der Sonne durch den Mond oder eine totale Sonnenfinsternis statt; an jenen Orten dagegen, welche im Halbschatten liegen, bleibt noch ein sichelförmiger Teil der Sonnenscheibe sichtbar, und die Finsternis ist nur eine partiale. Zuweilen ist der Mond zur Zeit der Sonnenfinsternis so weit von der Erde entfernt, dafs die Spitze des Kernschattens die Erdoberfläche nicht mehr trifft. Dann entsteht im Mittelpunkt des Halbschattens eine ringförmige Sonnenfinsternis. Der Kernschatten der Erde erstreckt sich auf eine Entfernung von 216 Erdhalbmessern, und reicht also weit über die Mondbahn hinaus, deren Radius nur 60 Erdhalbmesser beträgt. Zur Zeit des Vollmondes kann es sich ereignen, dafs der Mond ganz oder teilweise in den Erdschatten eintaucht und uns das Schauspiel einer Mondfinsternis gewährt.

317. **Dunkelkammer** (Levi ben Gerson 1321; Lionardo da Vinci; Porta, 1558). Bringt man im Fensterladen eines verdunkelten Zimmers eine kleine Öffnung (von 1—3 mm Durchmesser) an, so gewahrt man auf einem derselben gegenübergestellten Papierschirm ein umgekehrtes Bild der äufseren Gegenstände mit allen ihren Formen und Farben. Durch folgenden Versuch wird die Entstehung dieses Bildes erläutert. Vor einem mit einer kleinen Öffnung *O* (Fig. 293) versehenen Schirm steht eine brennende Kerze (oder ein elektrisches Glühlicht), hinter demselben ein weifser Papierschirm. Von den unzähligen Lichtstrahlen, die z. B. der oberste Punkt *A* der Flamme nach allen Richtungen hin aussendet, dringt nur ein schmales kegelförmiges Strahlenbündel *Aa* durch die Öffnung und erzeugt auf dem Schirme einen kleinen hellen Fleck *a*, der vermöge der geradlinigen Ausbreitung der Lichtstrahlen nur von dem Lichte des Punktes *A* erleuchtet ist, während keine andere Stelle des Schirmes von diesem Punkte her Licht empfangen kann. Ebenso wird die Stelle *b* weiter oben auf dem Schirme nur von dem unteren Punkte *B* des Gegenstandes aus erleuchtet. Indem so jeder Punkt des Gegenstandes sein Licht gesondert nach einer anderen Stelle des Schirmes sendet, setzt sich durch stetige Aneinanderreihung der unzähligen hellen Flecke ein Bild *ab* zusammen, welches, wie aus der Zeichnung unmittelbar folgt, umgekehrt und dem Gegenstande *AB* ähnlich ist und um so gröfser wird, je weiter man den Auffangschirm von der kleinen Öffnung wegrückt, aber auch um so lichtschwächer, weil sich dann dieselbe Lichtmenge auf eine gröfsere Fläche verteilt. Dafs nur kleine Öffnungen im stande sind, solche Bilder zu erzeugen, versteht sich hiernach von selbst; denn nur sie vermögen jene Sonderung der Lichtstrahlen zu bewirken, welche die Grundbedingung zur Entstehung eines Bildes ist. Weite Öffnungen, welche nach jedem Punkte des Schirmes Strahlen von allen oder von sehr vielen Punkten des Gegenstandes gelangen lassen, sind hierzu nicht befähigt. Je kleiner die Öffnung, um so schärfer, aber auch um so lichtschwächer ist das Bild.

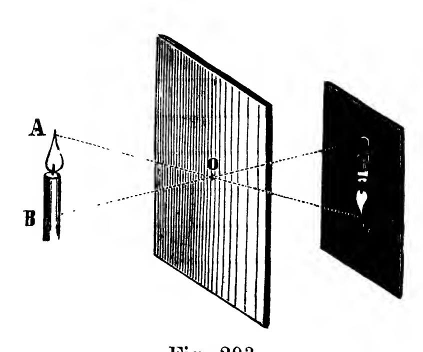


Fig. 293.
Entwerfung eines Bildes durch ein kleines Loch.

Da die unzähligen einzelnen Lichtflecke, aus denen sich das Bild zusammensetzt, mit ihren Rändern übereinandergreifen, kommen ihre eigenen Umrisse nirgends zur Geltung, und die Gestalt der Öffnung bleibt für das Gesamtbild gleichgültig. Die unregelmäfsig gestalteten Lücken zwischen den Blättern eines Baumes wirken wie ebenso viele kleine Öffnungen und zeichnen zahllose runde Sonnen-

bildchen auf den beschatteten Waldboden. Bei partialer Sonnenfinsternis zeigen diese Lichtflecke eine deutlich sichelförmige Gestalt.

318. **Sehwinkel** nennt man den Winkel, welchen die von den Endpunkten des Bildchens (Fig. 294 *ab*), das unser Auge von einem äufseren Gegenstand *AB* auf der Netzhaut entwirft, nach den entsprechenden Punkten des Gegenstandes gezogenen Linien miteinander bilden. Diese Linien kreuzen sich innerhalb des Auges in dem sog. Kreuzungspunkt. Ein Gegenstand erscheint uns um so gröfser, je gröfser der Raum ist, den sein Bildchen auf der Netzhaut einnimmt; die scheinbare Gröfse eines Gegenstandes wird daher durch den Sehwinkel bestimmt, unter welchem er uns erscheint. Ein und derselbe Körper erscheint unter einem um so kleineren Sehwinkel, seine scheinbare Gröfse ist um so geringer, je weiter er sich von unserem Auge entfernt, und zwei verschieden grofse Körper (*AB* und *A'B'* Fig. 294) erscheinen unter dem gleichen Sehwinkel, wenn ihre Entfernungen sich verhalten wie ihre Durchmesser. Kennt man die wahre Gröfse eines Gegenstandes, so kann man aus dem Sehwinkel auf seine Entfernung schliefsen, und umgekehrt, wenn die Entfernung und die scheinbare Gröfse bekannt ist, auf seine wirkliche Gröfse. Die Astronomen benutzen diese einfachen Beziehungen, um die Entfernung und die Gröfse der Himmelskörper zu ermitteln; man findet z. B. durch geeignete Beobachtungen, dafs der Erdhalbmesser, von der Sonne aus gesehen, unter einem Sehwinkel von nur 8,76 Sekunden (man nennt diese Gröfse die Parallaxe der Sonne) erscheinen würde, und man berechnet daraus die Entfernung der Erde von der Sonne zu 23500 Erdhalbmesser; und nachdem diese Entfernung bekannt ist, ergibt sich aus dem Sehwinkel von 32 Minuten, unter welchem wir die Sonne sehen, deren Durchmesser 110 mal so grofs als derjenige der Erde. Dieselben Operationen, durch welche der Astronom zu diesen Ergebnissen gelangt, vollzieht unser von Jugend auf geschultes Urteil in unbewufster Weise, wenn wir die Entfernung und Gröfse der irdischen Gegenstände nach dem Augenmafs schätzen. Der Sehwinkel, unter welchem uns eine menschliche Gestalt oder andere Gegenstände von bekannter Gröfse erscheinen, gibt uns den Anhaltspunkt, um auf ihre Entfernung zu schliefsen, und die bekannte Entfernung wieder erlaubt uns, die wirkliche Gröfse der Gegenstände zu beurteilen. Da der scheinbare Durchmesser der Sonne nur 32′ beträgt, so weichen die Sonnenstrahlen in ihrer Richtung höchstens um diesen kleinen Winkel (beiläufig $^1/_2{}^0$) voneinander ab, und können daher als nahezu unter sich parallel angesehen werden.

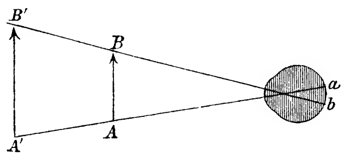


Fig. 294.
Sehwinkel.

319. **Photometrie.** Denkt man sich um einen leuchtenden Punkt Kugelflächen beschrieben, deren Halbmesser sich verhalten wie

1:2:3:4 u. s. f., so fängt jede derselben, wenn sie allein vorhanden ist, das gesamte von jenem Punkt ausstrahlende Licht auf und wird dadurch erleuchtet. Da sich die Oberflächen dieser Kugeln verhalten wie die Quadrate ihrer Radien, so verbreitet sich die nämliche Strahlenmenge in der doppelten, dreifachen, vierfachen u. s. w. Entfernung auf 4, 9, 16 . . . mal so grofse Flächen; es müssen daher gleichgrofse Flächenstückchen bei 2, 3, 4 . . . mal so grofser Entfernung 4, 9, 16 . . . mal schwächer beleuchtet sein als in der einfachen Entfernung. Die Stärke der Beleuchtung einer Fläche steht daher im umgekehrten Verhältnis des Quadrates ihrer Entfernung vom leuchtenden Punkt.

Man bedient sich dieses Gesetzes, um zwei Lichtquellen hin-

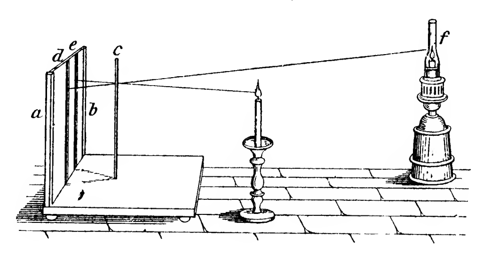



Fig. 295.
Photometer von Rumford.

sichtlich ihres Beleuchtungsvermögens oder ihrer Lichtstärke miteinander zu vergleichen und nach einer willkürlich gewählten Einheit zu messen. Zu diesem Zweck geeignete Vorrichtungen heifsen Photometer; sie beruhen sämtlich darauf, dafs man auf zwei dicht aneinander grenzenden Flächen durch Verschiebung der zu vergleichenden Lichtquellen gleiche Beleuchtungsstärke herstellt, was mit

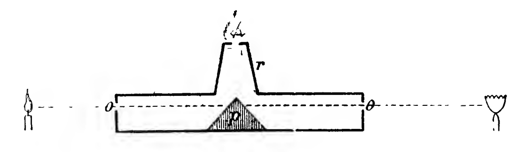



Fig. 296.
Photometer von Ritchie.

grofser Genauigkeit geschehen kann, da unser Auge schon einen Unterschied von $^1/_{60}$ bis $^1/_{100}$ der Beleuchtungsstärke bemerkt. Alsdann müssen sich nach dem obigen Gesetz die Leuchtkräfte der beiden Lichtquellen verhalten wie die Quadrate ihrer Entfernungen von den gleichbeleuchteten Flächen.

Ungemein einfach ist das Photometer von Rumford (Fig. 295). Vor einer weifsen Papierfläche *ab* steht ein undurchsichtiges Stäbchen *c*, etwa von der Dicke eines Bleistiftes. Jede der beiden Lichtquellen,

deren Leuchtkraft man vergleichen will, entwirft auf dem Schirm einen Schatten (*d* und *e*) des Stäbchens, deren jeder nur von derjenigen Lichtquelle beleuchtet wird, welche den andern erzeugt. Durch Verschieben der einen Lichtquelle (*f*) kann man es leicht erreichen, daſs beide Schatten, welche man zur besseren Vergleichung dicht nebeneinander bringt, gleichhell erscheinen; die Papierfläche empfängt jetzt von beiden Lichtquellen die gleiche Erleuchtung. Nach dem obenerwähnten Satz müssen sich alsdann die Lichtstärken der beiden Flammen verhalten wie die Quadrate ihrer Entfernungen von der Oberfläche. Nach Ritchie beleuchtet man mit den zu vergleichenden Lichtquellen die beiden zu einander rechtwinklig geneigten Seiten eines mit weiſsem Papier überzogenen hölzernen Keils *p* (Fig. 296), welcher sich in einem innen geschwärzten Kästchen befindet, dessen den Flächen des Keils gegenüberstehende Seiten mit Öffnungen *oo*

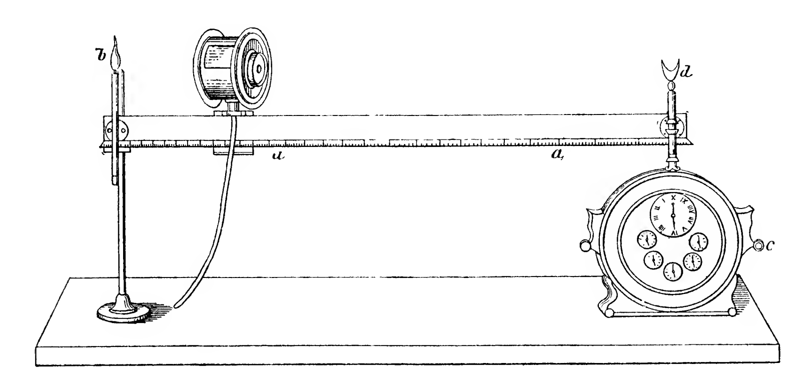



Fig. 297.
Photometer von Bunsen.

versehen sind. Durch eine Röhre *r* in der oberen Wand des Kästchens überblickt man zu gleicher Zeit die beiden Seiten des Keils, welche durch Verschiebung der Lichtquellen auf gleiche Helligkeit gebracht werden. Genauer und für technische Zwecke jetzt am häufigsten im Gebrauch ist das Photometer von Bunsen (Fig. 297). Dasselbe besteht im wesentlichen aus einem Papierblatt, in dessen Mitte sich ein mit Stearin gemachter Fettfleck befindet; dieser erscheint hell auf dunklem Grund, wenn der Papierschirm stärker von der Rückseite, dagegen dunkel auf hellem Grund, wenn er stärker von der Vorderseite beleuchtet wird. Hat man zwei Lichtquellen zu vergleichen, deren eine vor, die andere hinter dem Papierschirm aufgestellt ist, so verschiebt man entweder die eine Flamme oder den Papierschirm, bis der Fettfleck sich nicht mehr unterscheiden läſst; dies tritt ein, wenn die Beleuchtung von beiden Seiten gleich ist, und nun ergibt sich das Verhältnis der Lichtstärken wieder durch dieselbe einfache Rechnung wie oben. Um dieser Rechnung überhoben zu sein, kann man die

Latte, längs welcher der Papierschirm verschoben werden kann, und an deren Enden die Lichtquellen angebracht werden, so einteilen, dafs an der Stellung des Papierschirms unmittelbar die Lichtstärke abgelesen werden kann. Eine solche Einteilung findet sich z. B. bei der in Fig. 297 dargestellten Anordnung des Bunsenschen Photometers. Am einen Ende der geteilten Latte *aa* befindet sich die Flamme *b*, welche bei der Vergleichung als Einheit dient (die Normalflamme), am andern Ende die zu prüfende Lichtquelle, etwa eine Gasflamme *d*. Der Gasmesser *c* gibt den stündlichen Gasverbrauch an. Längs der Latte ist ein cylindrisches Gehäuse verschiebbar, dessen Rückwand undurchsichtig ist, während sich in der vordern Wand das Papierblatt mit dem Fettfleck befindet. In dem Gehäuse brennt eine kleine Gasflamme. Man nähert dasselbe bis auf 20 cm der Normalflamme und regelt dann die kleine Gasflamme so, dafs der zur Normalflamme gekehrte Fettfleck verschwindet. Dann dreht man das Gehäuse mit seinem Papierschirm gegen die zu prüfende Gasflamme *d* und nähert es derselben, bis der Fettfleck abermals verschwindet. Ein mit dem Gehäuse verbundener Zeiger gibt alsdann auf der Latte die gesuchte Lichtstärke an. (Über das Photometer von Lummer-Brodhun siehe 326.)

Sind die Flammen ungleich gefärbt, so werden die Ergebnisse unzuverlässig, weil unser Auge in der Beurteilung der Gleichheit zweier verschiedenfarbiger Beleuchtungen unsicher ist.

Als Normalflamme dient in Deutschland diejenige einer Paraffinkerze von 2 cm Durchmesser bei 50 mm Flammenhöhe, oder die Hefnersche Amylacetatlampe (Hefnerlampe) bei 40 mm Flammenhöhe. Das Hefnerlicht verhält sich zur Normalkerze wie 1 : 1,2. Die internationale Konferenz der Elektriker (1884) hat als Einheit der Lichtstärke festgesetzt die Lichtstärke von 1 qcm geschmolzenen Platins bei seiner Erstarrungstemperatur. Als Einheit der Beleuchtungsstärke wird diejenige Beleuchtung genommen, die eine Hefnereinheit in 1 m Entfernung hervorbringt. (1 Meterkerze, oder besser 1 Lux.) Die normale Beleuchtungsstärke zum Lesen soll 50 Lux. betragen. Das hygienische Minimum für Arbeiten mit den Augen ist 10 Lux.

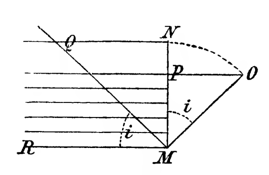


Fig. 298.
Schiefe Beleuchtung.

Jedes der beschriebenen Photometer kann auch umgekehrt dazu dienen, das obige Grundgesetz durch Versuche zu bestätigen, indem man z. B. nachweist, dafs vier sehr nahe bei einander stehende Kerzenflammen in der doppelten Entfernung dieselbe Erleuchtung hervorbringen wie eine Flamme in der einfachen Entfernung.

Bisher wurde vorausgesetzt, dafs die zu beleuchtende ebene Fläche *MN* (Fig. 298) von den Strahlen senkrecht oder nahezu senkrecht getroffen werde; wird dieselbe um den Winkel *i* in die Lage *MO* gedreht, so wird sie nur noch von einem Strahlenbündel getroffen, dessen Querschnitt *MP* sich zur ganzen Fläche

$MN$ oder $MO$ verhält wie $\cos i : 1$. Der Winkel $i$, welcher der nämliche ist wie derjenige, den die Richtung der einfallenden Strahlen mit der auf $MO$ errichteten Senkrechten $MQ$, dem Einfallslote, bildet, heifst der Einfallswinkel. Die Beleuchtungsstärke durch schief einfallende Strahlen ist also dem Cosinus des Einfallswinkels proportional.

320. **Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts** ist so ungeheuer grofs, dafs es die gröfsten irdischen Entfernungen, auf welche Lichtsignale reichen, fast augenblicklich durchläuft. Der dänische Astronom Olaf Römer war (1676) der erste, welcher dieselbe durch Beobachtung himmlischer Lichtsignale ermittelte. Der gröfste Planet unseres Sonnensystems, Jupiter, wird von vier Monden umkreist, welche bei jedem ihrer Umläufe, indem sie in den von dem Planeten hinter sich geworfenen Schatten treten, eine Verfinsterung erleiden. Bei dem ersten (dem Jupiter nächsten) Mond beträgt die Zeit zwischen je zwei aufeinander folgenden Verfinsterungen 42 Stunden 28 Min. 36 Sek. Römer fand nun, dafs, wenn die Erde ihre gröfste Entfernung vom Jupiter erreicht hat, die Verfinsterung um 16 Min. 36 Sek. später gesehen wird, als sie nach der Berechnung hätte eintreten sollen, wenn die Erde in ihrer geringsten Entfernung vom Jupiter geblieben wäre. Diese Verspätung kann aber nichts anderes sein als die Zeit, welche das von dem Jupitermond im Augenblick vor seiner Verfinsterung ausgesandte Licht gebraucht hat zum Durchlaufen der Strecke, um welche die Erde in ihrer entferntesten Lage vom Jupiter weiter absteht als in ihrer nächsten Lage. Da diese Strecke gleich dem Durchmesser der Erdbahn ist, also ungefähr 299 Mill. km beträgt, und in 996 Sek. durchlaufen wird, so ergibt sich, dafs das Licht in 1 Sek. etwa 300 000 km zurücklegt.

Die nämliche Zahl leitete Bradley 50 Jahre später aus der Aberration des Lichts der Fixsterne ab. Die Achse $mos$ (Fig. 299) eines Fernrohrs $AB$ sei nach irgend einem Himmelskörper, z. B. einem Fixstern, gerichtet, so werden sich die von dem Stern kommenden Lichtstrahlen in dem Punkt $m$ zu einem Bilde des Sterns vereinigen. Bewegt sich nun das Fernrohr parallel mit sich selbst in einer zu den einfallenden Lichtstrahlen senkrechten Richtung $m'm$ und zwar so, dafs es den Weg $m'm$ zurücklegt in der Zeit, in welcher das Licht die Strecke $om$ durchläuft, so werden sich die am Anfang dieser Zeit bei $o$ eingedrungenen Lichtstrahlen, unbekümmert um die Bewegung des Fernrohrs, zwar immer noch in dem nämlichen Punkt $m$ des Raumes vereinigen; aber an diese Stelle, welche am Anfang jener Zeit von dem Mittelpunkt des Gesichtsfelds eingenommen war, wird im Augenblick der Vereinigung der Strahlen der seitlich gelegene Punkt $m'$ des Gesichtsfelds getreten sein. Das Bild des Sterns wird demnach infolge der Bewegung des Fernrohrs an einer Stelle des

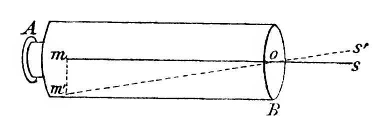


Fig. 299.
Aberration.

Gesichtsfelds gesehen, an welcher bei ruhendem Fernrohr Strahlen, die in der Richtung $s'om'$ einfallen, sich vereinigen würden. Der Stern wird also vermöge dieser sogenannten „Aberration des Lichts“, statt an seinem wahren Ort, in der Richtung $m'os'$ gesehen, und man mufs, um sein Bild in die Mitte des Gesichtsfelds zu bringen, die Achse des Fernrohrs, indem man dasselbe um den Winkel $mom'$ dreht, in diese Richtung einstellen. Jedes Fernrohr ist aber thatsächlich in Bewegung, indem es ja von der Erde bei ihrer Bewegung um die Sonne mitgenommen wird. Es mufs daher jeder Stern, dessen Strahlen die Erdbahn senkrecht treffen, in der Richtung der jeweiligen Bewegung der Erde verschoben erscheinen, um einen Winkel $mom'$, dessen Gröfse bedingt ist durch das Verhältnis der Strecken $m'm$ und $om$, welche die Erde einerseits und das Licht andererseits in der gleichen Zeit durchlaufen, d. h. durch das Verhältnis der Geschwindigkeit der Erde zur Geschwindigkeit des Lichts. Dieser für alle Gestirne gleiche Aberrationswinkel kann gemessen werden; er ist sehr klein, nämlich nur $20^1/_2$ Sek. Nun ist aber in einem rechtwinkligen Dreieck $mom'$, dessen Winkel bei $o$ $20^1/_2$ Sek. beträgt, die Seite $om$ 10000 mal so grofs als die Seite $mm'$; folglich mufs auch die Geschwindigkeit des Lichts 10000 mal so grofs sein als die Geschwindigkeit der Erde in ihrer Bahn. Die Erde legt aber in jeder Sek. 30 km zurück, folglich durcheilt das Licht in derselben Zeit 300000 km.

Durch ein sinnreiches Verfahren hat Fizeau (1849) und später Cornu die Geschwindigkeit des Lichts auch bei irdischen Lichtquellen gemessen. Läfst man nämlich durch eine der Lücken am Umfang eines gezahnten Rads einen Lichtstrahl genau senkrecht auf einen entfernten Spiegel fallen, so kehrt derselbe auf dem nämlichen Weg zurück und gelangt, wenn das Rad in Ruhe ist, durch dieselbe Lücke zum Auge des Beobachters. Versetzt man nun das Rad in immer raschere Umdrehung, so kann man es dahin bringen, dafs in der Zeit, welche das Licht braucht, um den Weg vom Rad bis zum Spiegel und wieder zurück zu durchlaufen, das Rad sich um eine Zahnbreite weitergedreht hat, sonach das zurückgekehrte Licht von dem Zahn, der nun an die Stelle der Lücke getreten ist, aufgefangen und für den Beobachter unsichtbar wird. Endlich hat Foucault (1850) nach einem Verfahren, das erst später zur Sprache kommen wird, die Lichtgeschwindigkeit sogar im Raume eines Zimmers zu messen vermocht.

Auch aus diesen Versuchen mit irdischem Licht ergab sich die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts zu 300000 km. Ein Lichtstrahl durchläuft also in einer Sekunde eine Strecke, welche $7^1/_2$ mal so grofs ist als der Umfang der Erde (40000 km). Die Fixsterne sind so ungeheuer weit entfernt, dafs ihr Licht ungeachtet seiner grofsen Geschwindigkeit Jahre gebraucht, um zu uns zu gelangen; würde der Sirius in diesem Augenblicke erlöschen, so würden wir ihn noch 14 Jahre lang am Himmel glänzen sehen; denn so lange würde sein letzter Lichtstrahl unterwegs sein, bis er unser Auge erreichte.

321. **Gesetz der Zurückwerfung** (Reflexion, Spiegelung). Fällt ein Lichtstrahl *am* (Fig. 300) auf einen Spiegel *ss* (so nennt man jede glatte Fläche), so wird ein Teil desselben in ganz bestimmter Richtung *mb* von der Fläche in den vor ihr befindlichen Raum zurückgeworfen (reflektirt). Um die Richtungen des einfallenden (*am*) und des zurückgeworfenen Strahls (*mb*) bequem zu bezeichnen, denkt man sich auf der spiegelnden (ebenen oder gekrümmten) Fläche in dem Punkt *m*, wo der einfallende Strahl dieselbe trifft, eine Senkrechte, das Einfallslot, errichtet. Die durch den einfallenden Strahl und das Einfallslot gelegte Ebene (die Ebene der Zeichnung), welche senkrecht steht auf der spiegelnden Fläche, heifst die Einfallsebene; sie wird, weil sie stets auch den zurückgeworfenen Strahl enthält, auch Zurückwerfungs- oder Reflexionsebene genannt. Die Richtungen des einfallenden und des zurückgeworfenen Strahls werden bestimmt durch den Einfallswinkel *i* und den Zurückwerfungswinkel *r*, welche der einfallende Strahl diesseits, der zurückgeworfene jenseits mit dem Einfallslot bildet. Der Zurückwerfungswinkel ist stets dem Einfallswinkel gleich. Ein auf einen Spiegel senkrecht auffallender Strahl (*pm*) wird in sich selbst (nach *mp*) zurückgeworfen.

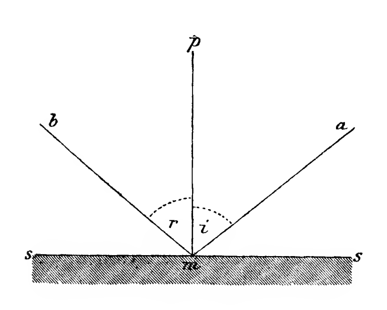



Fig. 300.
Zurückwerfung des Lichts.

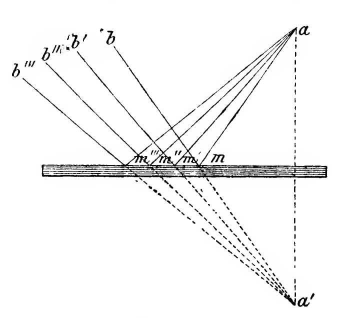



Fig. 301.
Entstehung des Bildpunktes bei einem ebenen Spiegel.

Aus diesem Gesetz folgt unmittelbar, dafs alle Strahlen (Fig. 301, *am*, *am'* . . .), welche von einem hellen Punkt *a* ausgehend auf einen ebenen Spiegel (Planspiegel) treffen, von demselben so zurückgeworfen werden (*mb*, *m'b'* . . .), als kämen sie von einem Punkt *a'*, welcher auf der von dem Lichtpunkt aus auf den Spiegel gezogenen Senkrechten *aa'* ebensoweit hinter der spiegelnden Ebene liegt als der Lichtpunkt *a* vor derselben (Kongruenz der Dreiecke *amm'* und *a'mm'*). Ein Auge, das sich vor dem Spiegel (z. B. in *b''*) befindet, empfängt daher die zurückgeworfenen Strahlen gerade so, als ob der zu *a* in Bezug auf die Spiegelebene symmetrische Punkt *a'*, von dem sie auszugehen scheinen, selbst ein heller Punkt wäre; es sieht in (d. h. hinter) dem Spiegel in der Richtung *b''a'* den Punkt *a'* als

Bild des vor dem Spiegel befindlichen Punktes *a*. Jedem Punkt eines leuchtenden oder beleuchteten Gegenstands entspricht in derselben Weise ein Bildpunkt hinter dem Spiegel, und aus der Gesamtheit aller Bildpunkte entsteht das Spiegelbild des Gegenstands. Um dieses Bild zu entwerfen, denke man sich von jedem Punkte des Gegenstands eine Senkrechte auf die (nötigenfalls erweiterte) Spiegelebene gezogen und hinter derselben um ebensoviel verlängert, als jener Punkt vor ihr liegt. Das Spiegelbild ist hiernach seinem Original nicht völlig gleich oder kongruent, sondern zu ihm symmetrisch. Unsere rechte Hand spiegelt sich als linke, und die Buchstaben in dem Spiegelbild eines Buches gehen von rechts nach links, und nicht von links nach rechts, wie in dem Buche selbst.

Von der symmetrischen Lage des Spiegelbildes zu seinem Gegenstand, aus welcher umgekehrt die Richtigkeit des Reflexionsgesetzes folgt, kann man sich besonders augenfällig überzeugen, wenn man als Spiegel eine durchsichtige Glasplatte wählt, durch welche man gleichzeitig auch die hinter der spiegelnden Fläche befindlichen Gegenstände wahrnimmt. Vor die Glasplatte stelle man eine brennende Kerze, hinter sie an den durch obige Konstruktion gefundenen Ort des Bildes eine mit Wasser gefüllte Karaffe, so erhält man den Eindruck, als ob die Kerze im Innern der Flasche unter Wasser brenne. Dieser einfache Versuch gibt die Erklärung der unter der Bezeichnung „Gespenstererscheinungen“ bekannten Schaustellungen.

322. **Anwendungen ebener Spiegel.** Heliostat nennt man eine Vorrichtung, um die Sonnenstrahlen in bestimmter, z. B. wagrechter, Richtung ins verdunkelte Zimmer zu lenken. Er besteht aus einem ebenen Spiegel, welcher, entweder durch Einstellung mit der Hand oder durch ein Uhrwerk getrieben, dem Lauf der Sonne derart folgt, dafs er ihre Strahlen immer nach jener bestimmten Richtung zurückwirft.

Um die Mitte eines in Grade geteilten Kreises (Fig. 302) ist eine kleine Platte *M* drehbar, mit welcher der auf die Teilung weisende mit Nonius versehene Zeiger *A* (Alhidade) fest verbunden ist. Auf ein Glasprisma, das auf der Platte *M* steht, falle ein schmales Bündel paralleler Sonnenstrahlen, welche mittels des Heliostaten durch einen vertikalen Spalt ins Zimmer geleitet werden. Die an der Vorderfläche des Prismas zurückgeworfenen Strahlen erzeugen auf einem Schirme *S* einen hellen vertikalen Strich, dessen Stelle durch eine Marke bezeichnet wird. Dreht man nun die Alhidade und mit ihr das Prisma so lange, bis eine zweite Fläche des Prismas die Strahlen nach der nämlichen Richtung *MS* zurückwirft, d. h. bis der helle Strich sich gerade wieder an der Marke befindet, so mufs jetzt die zweite Fläche genau die nämliche Lage haben wie vorhin die erste. Wäre die zweite Fläche mit der ersten parallel, so hätte man die Alhidade offenbar um $180^0$ drehen müssen, um den Lichtfleck wieder an die Marke zu bringen. Bildet aber die zweite Fläche mit der ersten einen Winkel $\alpha$, so erreicht man dies schon durch

eine Drehung von $180 - \alpha$ Graden. Um also den Winkel $\alpha$ zwischen den beiden Prismenflächen zu erfahren, braucht man nur den Drehungswinkel der Alhidade von $180^0$ abzuziehen. Instrumente, welche, nach diesem Prinzip konstruirt, eine genaue Messung der Flächenwinkel an Prismen und Krystallen gestatten, nennt man Reflexions-Goniometer (Wollaston, 1809).

Dreht man die Spiegelebene um irgend einen Winkel, so dreht sich der zurückgeworfene Strahl um den doppelten Winkel (vgl. Fig. 303 und Fig. 304).

Die Anwendung ebener Spiegelchen zur genauen Messung kleiner Drehungswinkel (Spiegelablesung, Poggendorff, 1827) sowie Jollys Spiegelskala wurde schon früher erwähnt (100, 143 u. 217).

323. **Winkelspiegel.** Da die zurückgeworfenen Strahlen von dem Bild hinter einem Spiegel gerade so ausgehen wie von einem

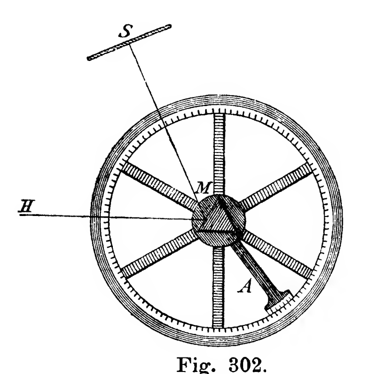



Fig. 302.
Prinzip des Reflexions-Goniometers.

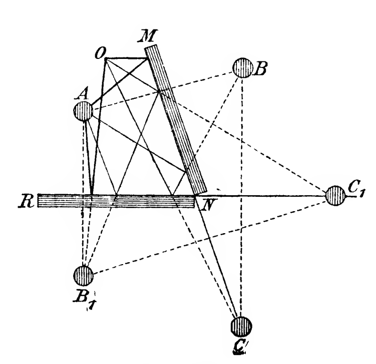



Fig. 303.
Winkelspiegel.

wirklich dort befindlichen Gegenstand, so kann jedes Spiegelbild einem zweiten Spiegel gegenüber wieder die Rolle eines Gegenstands spielen; bei Anwendung zweier Spiegel, deren spiegelnde Flächen einander zugewendet sind, entstehen daher außer den beiden unmittelbaren Spiegelbildern (erster Ordnung) noch solche zweiter, dritter und höherer Ordnung, welche aber wegen der Lichtverluste bei den wiederholten Zurückwerfungen immer lichtschwächer werden. Bringt man z. B. eine brennende Kerze zwischen zwei einander parallel gegenüberhängende Spiegel, so erblickt man in jedem eine unabsehbare Reihe von Kerzenflammen, welche sich in unendlicher Ferne zu verlieren scheint. Die Zahl der Bilder wird eine begrenzte, wenn die beiden Spiegel einen Winkel miteinander bilden (Winkelspiegel, Fig. 303). Die Spiegel $MN$ und $RN$ liefern von dem zwischen ihnen befindlichen Gegenstand $A$ die Bilder erster Ordnung $B$ und $B_1$. Indem das Bild $B$ hinter dem ersten Spiegel seine Strahlen dem zweiten Spiegel zusendet, entwirft dieser ein Bild zweiter Ordnung $C$ und ebenso der erste Spiegel ein Bild $C_1$ des Bildes $B_1$. Damit ist aber

für den in der Zeichnung angenommenen Winkel von 72° die Anzahl der Bilder erschöpft. Ein zwischen die Spiegel blickendes Auge *O* sieht die Bilder nebst dem Gegenstand auf einem um den Kreuzungspunkt der beiden Spiegel beschriebenen Kreis regelmäfsig angeordnet, und zwar trifft auf jeden Winkelraum, welcher dem Winkel der beiden Spiegel gleich ist, je ein Bild. Das Auge *O* sieht daher den Gegenstand sovielmal, als dieser Winkel in dem ganzen Umfang (360°) enthalten ist. Auf die regelmäfsige Anordnung der Bilder der Winkelspiegel gründet sich die anmutige Wirkung des Kaleidoskops (Brewster, 1817); dasselbe besteht aus zwei unter 60° zu einander geneigten Spiegelstreifen, welche in einem innen geschwärzten Rohre stecken; am einen Ende der Röhre befindet sich ein kleines Loch zum Durchsehen, am anderen Ende zwischen zwei Glasplatten, von denen die äufsere matt geschliffen ist, eine Anzahl farbiger Glasstückchen, Federspitzchen, Mooszweige, Samenkörner etc. Durch das Loch blickend, sieht man diese Gegenstände versechsfacht zu einem sechsstrahligen Stern geordnet, der beim Schütteln sich immer wieder anders gestaltet und so einen unerschöpflichen Reichtum der zierlichsten Muster vor Augen führt. Ist der Winkel eines Winkelspiegels genau ein rechter, so gibt er drei Bilder. Blickt man von vorne so in ihn hinein, dafs man die seitlichen Bilder nicht sieht, sondern nur das mittelste, so erscheint dieses genau so wie in einem ebenen Spiegel, nur dafs rechts und links vertauscht sind, wenn die Spiegelkante vertikal steht; man sieht sich auf dem Kopfe stehend, wenn die Spiegelkante horizontal ist.

324. **Spiegelsextant.** In Fig. 304 seien *A* und *B* zwei kleine ebene Spiegel, welche ihre reflektirenden Flächen einander zuwenden. Befinden sich nun bei *L* und *R* zwei Gegenstände, von denen der erstere für ein in *O* befindliches Auge über den Spiegel *B* hinweg in der Richtung *O B* sichtbar ist, so kann man dem Spiegel *A* eine solche Stellung geben, dafs das von *R* herkommende Licht nach zweimaliger Reflexion auf dem Wege *R A B O* ins Auge gelangt, und sonach beide Gegenstände, der eine direkt, der andere gespiegelt, in der nämlichen Richtung *O B* gesehen werden. Alsdann ergibt sich aus dem Reflexionsgesetz, dafs der Winkel $LOR = \alpha$, welchen die vom Auge nach *L* und *R* gerichteten Sehlinien einschliefsen, doppelt so grofs ist als der Winkel $ACB = \beta$ zwischen den beiden Spiegelebenen. Denkt man sich nämlich auf letzteren die Einfallslote *A D* und *B D* errichtet, welche sich bei *D* unter dem Winkel $\beta$ schneiden, so ergibt sich, wenn $\varphi$ und $\psi$ die Einfallswinkel der Strahlen *R A* und *A B* auf die Spiegel *A* und *B* bezeichnen, aus der Betrachtung des Dreiecks $ABD$: $\beta = \varphi - \psi$, und aus der Betrachtung des Dreiecks $AOB$: $\alpha = 2\varphi - 2\psi$, woraus folgt: $\alpha = 2\beta$. Um nun den Winkel $\beta$ messen

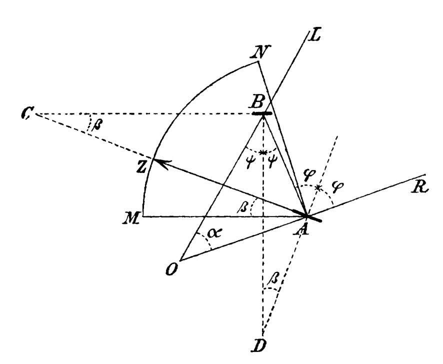


Fig. 304.
Prinzip des Spiegelsextanten.

zu können, macht man den Spiegel $A$ drehbar um den Mittelpunkt eines geteilten Kreisbogens $MN$ und verbindet ihn mit einem auf die Teilung weisenden Zeiger (Alhidade) $AZ$. Den Spiegel $B$ befestigt man auf der Ebene des Kreises parallel mit dem Radius $AM$, welcher nach dem Nullpunkt der Teilung geht. Schaut man nun in der Richtung $OL$, etwa durch ein an dem Instrument befestigtes Fernrohr, nach dem Gegenstand $L$, und dreht die Alhidade und mit ihr den Spiegel $A$ so lange, bis auch das Spiegelbild von $R$ in dieser Richtung gesehen wird, so gibt der doppelte Wert des an der Alhidade abgelesenen Winkels $\beta$ sofort auch den Winkel $\alpha$ an. Dieses sinnreiche Winkelmefsinstrument, von Newton erdacht und von Hadley (1731) zuerst ausgeführt, heifst Spiegelsextant, weil, um Winkel bis zu $120^0$ zu messen, der Bogen $MN$ nur $^1/_6$-Kreis (Sextant) zu sein braucht. Vor anderen Winkelinstrumenten zeichnet sich der Sextant dadurch aus, dafs er keine feste Aufstellung erfordert, sondern während der Messung frei in der Hand gehalten wird. Er ist deshalb zur See der einzige brauchbare Apparat zur Ausführung derjenigen Messungen, aus welchen der Seefahrer den Ort seines Schiffes nach geographischer Länge und Breite bestimmt.

325. **Kugelspiegel. (Sphärische Spiegel.)** Eine kugelförmig gekrümmte Schale, welche auf ihrer Innenseite glatt polirt ist, bildet einen Hohlspiegel (Konkavspiegel). Der Mittelpunkt der Hohlkugel, von welcher die Schale ein Abschnitt ist, heifst der Krümmungsmittelpunkt, und jede durch ihn gezogene gerade Linie eine Achse des Spiegels; unter ihnen wird diejenige, welche die Schale in ihrem mittelsten tiefsten Punkte oder Scheitel ($O$, Fig. 305) trifft, als Hauptachse bezeichnet. Der Winkel $MCM'$, welchen die vom Kugelcentrum nach zwei diametral gegenüberliegenden Punkten des Spiegelrandes gezogenen Linien miteinander bilden, heifst die Öffnung des Spiegels.

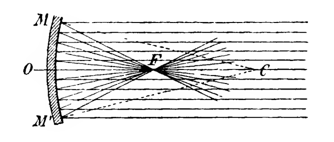



Fig. 305.
Brennpunkt eines Hohlspiegels.

Jeder längs einer Achse sich fortpflanzende Strahl (Achsenstrahl) trifft senkrecht auf den Spiegel und wird daher in sich selbst

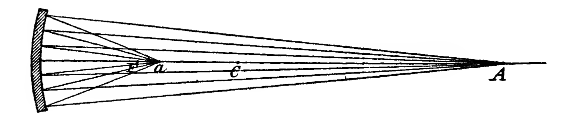



Fig. 306.
Konjugirte Punkte.

zurückgeworfen. Läfst man ein Bündel paralleler Sonnenstrahlen (Fig. 305) auf einen Hohlspiegel von kleiner Öffnung unter geringer Neigung zur Hauptachse fallen, so werden dieselben in Form eines Lichtkegels zurückgeworfen, dessen Spitze $F$ vor dem Spiegel auf der mit den einfallenden Strahlen parallelen Achse liegt. Dieser Punkt $F$, durch welchen sämtliche auf den Spiegel parallel mit der Achse treffenden Strahlen nach der Reflexion hindurchgehen, heifst der zu dieser Achse gehörige Brennpunkt, der auf der Hauptachse gelegene heifst der **Hauptbrennpunkt**. Auf einem Papierblättchen, welches man an seine Stelle bringt, erscheint er als weifser Fleck von blendender

Helligkeit, bis das Papier unter der kräftigen Wärmewirkung der vereinigten Strahlen Feuer fängt und dadurch zeigt, daſs der Name „Brennpunkt“ ein wohlverdienter ist. Wegen dieser Wirkung nennt man den Hohlspiegel auch Brennspiegel. Der Brennpunkt liegt auf der Achse gerade in der Mitte zwischen dem Spiegel und dessen Krümmungsmittelpunkt, oder die Brennweite ist die Hälfte des Kugelhalbmessers. Sämtliche Brennpunkte für die verschieden geneigten Achsen liegen auf einer zur Hauptachse senkrechten Fläche, welche, wenn die Einfallswinkel sehr klein sind, als eine Ebene angesehen werden kann und Brennebene heiſst.

Jeder Strahl, welcher nicht durch den Kugelmittelpunkt (Fig. 305 $C$) geht, trifft schräg auf die Spiegelfläche und wird so zurückgeworfen, daſs er mit dem an seinem Einfallspunkt an der Spiegelfläche errichteten Einfallslot beiderseits gleiche Winkel bildet. Das Einfallslot ist aber jedesmal der vom Krümmungsmittelpunkt zum Einfallspunkt gezogene Kugelhalbmesser. Sind die Einfallswinkel sehr klein,

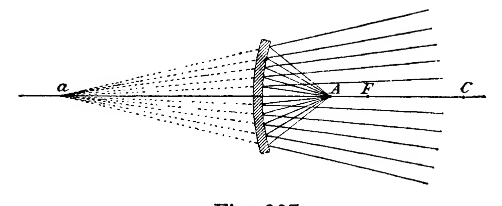



Fig. 307.
Konjugirte Punkte.

so sind die Kugelhalbmesser, d. h. die Einfallslote, in demselben Maſse stärker zur Achse geneigt, als die Punkte des Spiegels, zu denen sie gehören, weiter von der Achse abstehen. Deshalb muſs auch jeder mit der Achse parallele Strahl in dem Maſse stärker gegen die Achse zu aus seiner ursprünglichen Richtung abgelenkt werden, als er weiter entfernt von der Achse auf den Spiegel trifft. Aus diesem Verhalten erklärt es sich, warum sämtliche auf den Hohlspiegel parallel zur Achse treffenden Strahlen nach der Zurückwerfung durch einen und denselben Punkt gehen müssen. Befindet sich im Brennpunkt $F$ eine Lichtquelle, so werden ihre auf den Spiegel treffenden Strahlen, indem sie dieselben Wege in entgegengesetzter Richtung einschlagen, parallel zu der Achse zurückgeworfen. Fällt von einem Lichtpunkte $a$ (Fig. 306), der zwischen dem Brennpunkt $F$ und dem Kugelmittelpunkt $C$ liegt, ein Strahlenbüschel auf den Spiegel, so treffen die einzelnen Strahlen jetzt minder schräg auf den Spiegel, als wenn sie aus dem Brennpunkt kämen, und werden daher auch weniger stark von der Achse weggelenkt; sie laufen daher nach der Zurückwerfung nicht mit der Achse parallel, sondern schneiden sie jenseits des Mittelpunktes $C$, und zwar, da ihre Ablenkung um so gröſser ist, je weiter der getroffene Spiegelpunkt von der Achse absteht, in einem einzigen Punkt $A$, welchen man das

Bild des Punktes *a* nennt. Bringt man nach *A* einen Lichtpunkt, so müssen seine Strahlen, indem sie sich auf denselben Bahnen in entgegengesetzter Richtung bewegen, im Punkt *a* zusammentreffen. Die Punkte *a* und *A* gehören also in der Weise zusammen, daſs jeder das Bild des andern ist, und heiſsen deshalb zugeordnete oder konjugirte Punkte. Der Brennpunkt ist zum unendlich fernen Punkte der Achse, der Krümmungsmittelpunkt zu sich selbst konjugirt.

Ist ein Lichtpunkt (Fig. 307 *A*) um weniger als die Brennweite vom Spiegel entfernt, so vermag dieser die zu stark auseinanderfahrenden Strahlen nicht mehr in einem vor dem Spiegel gelegenen Punkt zu vereinigen, sondern die zurückgeworfenen Strahlen gehen jetzt auseinander, so, als ob sie von einem hinter dem Spiegel gelegenen Punkt *a* ausgingen. Da umgekehrt Strahlen, die nach dem hinter dem Spiegel gelegenen Punkte *a* hinzielen, im Punkt *A* vor dem Spiegel vereinigt werden, so sind auch in diesem Falle die Punkte *A* und *a* als zugeordnete (konjugirte) zu betrachten.

Man kann also ganz allgemein sagen: Alle Strahlen, welche von einem Punkte herkommend oder nach einem Punkte hinzielend (homocentrisch) unter kleinen Einfallswinkeln auf einen Kugelspiegel treffen, gehen auch nach der Zurückwerfung wieder durch einen einzigen Punkt (entweder wirklich oder rückwärts verlängert),

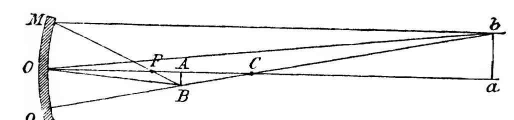



**Fig. 308.**
Konjugirte Punkte und Ebenen.

welcher auf der zu jenem ersten Punkt gehörigen Achse liegt; sie bleiben also auch nach der Zurückwerfung homocentrisch.

Um zu einem Lichtpunkt *B* (Fig. 308) den konjugirten Bildpunkt *b* durch Konstruktion zu finden, braucht man daher nur zwei reflektirte Strahlen zu zeichnen, die man so wählen kann, daſs die Zeichnung möglichst bequem wird; denn, wo diese beiden Strahlen sich schneiden, müssen auch alle übrigen zusammentreffen. Man wählt z. B. wie in Fig. 308 den Achsenstrahl *BC*, der in sich selbst zurückkehrt, und den durch den Hauptbrennpunkt gehenden Strahl *BFM*, der parallel zur Hauptachse nach *Mb* zurückgeworfen wird. Legt man durch die Punkte *B* und *b* Ebenen senkrecht zur Hauptachse, welche dieselbe in *A* und *a* treffen, so sind auch *A* und *a* konjugirte Punkte, weil wegen der Kleinheit des Winkels *ACB* die Strecke *AO* von *Bo* und *aO* von *bo* nicht merklich verschieden ist. Diese Ebenen heiſsen ebenfalls konjugirt.

**Da** jedem Punkt eines leuchtenden oder beleuchteten Gegen**standes, der sich** vor einem Hohlspiegel befindet, ein auf der

zugehörigen Achse in der konjugirten Ebene gelegener Bildpunkt entspricht, so entsteht aus der Gruppirung sämtlicher Bildpunkte ein Bild des Gegenstandes. Befindet sich z. B. ein Gegenstand *AB* (Fig. 309) zwischen dem Brennpunkt *F* und dem Krümmungsmittelpunkt *C*, so liegt das Bild des Punktes *B* auf der Achse *BC* in *b*, dasjenige des Punktes *A* auf der Achse *AC* in *a*, u. s. f. Es entsteht daher jenseit *C* ein umgekehrtes vergröſsertes Bild *ab*. Wäre *ab* ein Gegenstand, welcher um mehr als die doppelte Brennweite vom Spiegel entfernt ist, so würde derselbe ein umgekehrtes verkleinertes Bild in *AB* zwischen dem Brennpunkt *F* und dem Kugelmittelpunkt *C* liefern. Man erkennt aus der Zeichnung Fig. 308, daſs Bild und Gegenstand einander ähnlich sind (aus der Ähnlichkeit der Dreiecke *ABC* und *abC*), und daſs ihre Gröſsen sich zu einander verhalten wie ihre Abstände vom Spiegel (weil die Dreiecke *AOB* und *aOb* einander ähnlich sind). Bild und Gegenstand bewegen sich in entgegengesetzter Richtung. Rückt der Gegenstand

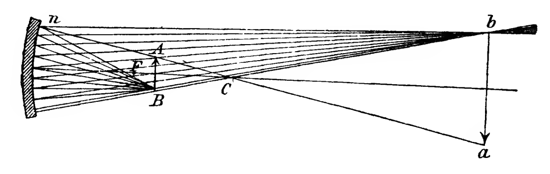



Fig. 309.
Entstehung eines reellen Bildes.

vom Brennpunkt weg gegen den Krümmungsmittelpunkt *C*, so kommt sein umgekehrtes vergröſsertes Bild aus unendlicher Ferne herein gegen *C*; hier, in der doppelten Brennweite, begegnen sich Bild und Gegenstand in gleicher Gröſse. Entfernt sich der Gegenstand über *C* hinaus, so nähert sich sein umgekehrtes verkleinertes Bild dem Brennpunkt. Das Bild eines unermeſslich weit entfernten Gegenstandes, z. B. der Sonne oder eines Gestirns, entsteht im Brennpunkt selbst.

Diese Bilder unterscheiden sich nun sehr wesentlich von den Bildern, welche von ebenen Spiegeln geliefert werden. Sie entstehen nämlich dadurch, daſs die von einem jeden Punkte des Gegenstandes ausgehenden Strahlen in einem Punkt vor dem Spiegel wirklich vereinigt oder gesammelt werden; ein solches Bild kann daher auf einem Schirm aufgefangen werden und erscheint auf demselben nach allen Seiten hin sichtbar. Bilder dieser Art nennt man deswegen wirkliche (reelle) oder Sammelbilder. Die Bilder der ebenen Spiegel dagegen entstehen durch Strahlen, welche nach der Zurückwerfung so auseinandergehen, daſs sie von hinter der Spiegelfläche liegenden Punkten auszugehen scheinen, und werden nur gesehen, wenn diese Strahlen ins Auge dringen; sie heiſsen daher scheinbare (virtuelle) oder Zerstreuungsbilder. Auch die reellen Bilder der Sammelspiegel (so nennt man häufig die Hohl-

spiegel) können ohne Auffangschirm unmittelbar wahrgenommen werden, wenn man das Auge in den Weg der Strahlen bringt, welche nach der Vereinigung von den Punkten des Bildes aus wieder auseinandergehen (Fig. 309 bei $b$). Das Bild scheint alsdann vor dem Spiegel in der Luft zu schweben.

Sammelbilder liefert ein Hohlspiegel nur von Gegenständen, welche um mehr als die Brennweite von ihm abstehen. Von einem dem Spiegel näheren Gegenstand (Fig. 310 $AB$) kann derselbe, weil die von jedem Punkt kommenden Lichtstrahlen nach der Zurückwerfung auseinandergehen, nur noch ein virtuelles Bild ($ab$) entwerfen, welches einem in den Spiegel blickenden Auge aufrecht hinter der Spiegelfläche und gröfser als der Gegenstand erscheint. Die Figur zeigt den Gang der Lichtstrahlen im gegenwärtigen Fall. Wegen dieser vergröfsernden Wirkung werden die Hohlspiegel auch Vergröfserungsspiegel genannt und zu Zwecken der Toilette (als Rasierspiegel) verwendet.

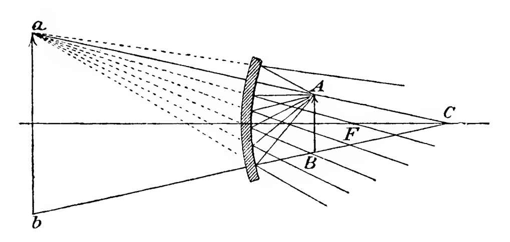


Fig. 310.
Entstehung eines virtuellen Bildes.

Jede auf der äußern gewölbten Seite polirte Kugelfläche bildet einen Konvexspiegel oder Zerstreuungsspiegel. Da ein Konvexspiegel die von einem Punkt (Fig. 311 $B$) ausgehenden Strahlen stets so zurückwirft, dafs sie von einem hinter dem Spiegel liegenden Punkt $b$ noch stärker als vorher divergiren, so kann derselbe von einem Gegenstand $AB$ nur ein virtuelles Bild $ab$ liefern, welches hinter dem Spiegel in aufrechter Stellung gesehen wird. Da das Bild stets kleiner ist als der Gegenstand, so nennt man die Konvexspiegel auch Verkleinerungsspiegel und verwendet sie ihrer niedlichen Bilder wegen als Taschentoilettespiegel. Strahlen, welche auf einen solchen Spiegel parallel mit einer Achse treffen, gehen von ihm so zurück, als kämen sie von einem Punkte, der auf der Achse um den halben Kugelradius hinter dem Spiegel liegt; dieser Punkt heifst der virtuelle Brennpunkt oder Zerstreuungspunkt, und spielt bei der Konstruktion der Bilder dieselbe Rolle wie der reelle Brennpunkt des Hohlspiegels (Fig. 305).

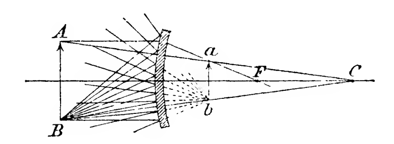


Fig. 311.
Entstehung des virtuellen Bildes bei einem Konvexspiegel.

Die Lage der konjugirten Punkte läfst sich auch leicht durch Rechnung finden. Ein beliebiger von $A$ (Fig. 312) ausgehender Strahl $AM$, der mit der zugehörigen Achse den Winkel $\alpha$ macht, wird im Punkte $M$ so reflektirt,

dafs Einfalls- und Reflexionswinkel einander gleich (beide $= \delta$) sind, und der zurückgeworfene Strahl schneidet die Achse im Punkte $B$ unter dem Winkel $\beta$. Wird noch der Winkel, welchen das von $C$ nach $M$ gezogene Einfallslot mit der Achse bildet, durch $\gamma$ bezeichnet, so ist ersichtlich $\beta = \gamma + \delta$ und $\alpha = \gamma - \delta$. Diese beiden Gleichungen zu einander addirt geben $\alpha + \beta = 2\gamma$. Sind alle genannten Winkel sehr klein, so ist die von $M$ auf die Achse gefällte Senkrechte $Md = k$ von dem Bogen $MO$ nicht merklich verschieden. Bezeichnet man nun den Radius des Spiegels mit $r$, die Entfernung des Lichtpunktes $OA$ (welche wegen der Kleinheit der Winkel nahezu $= dA$ und $= MA$ ist) mit $a$,

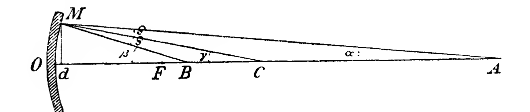



Fig. 312.
Bestimmung der Lage konjugirter Punkte.

die Entfernung des Bildpunktes $OB$ (nahezu $= dB$ und $= MB$) mit $b$, so kann man, indem man $Md = k$ als kleinen Bogen betrachtet, der nach der Reihe zu den Radien $a$, $b$, $r$ gehört, die Winkel $\alpha$, $\beta$, $\gamma$ so ausdrücken:

$$\alpha = \frac{k}{a}, \qquad \beta = \frac{k}{b}, \qquad \gamma = \frac{k}{r}.$$

Die obige Gleichung $\alpha + \beta = 2\gamma$ wird alsdann, wenn man diese Werte in sie einsetzt, zunächst

$$\frac{k}{a} + \frac{k}{b} = \frac{2k}{r},$$

oder, weil der gemeinschaftliche Faktor $k$ sich weghebt:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{2}{r}.$$

Ist der Strahl $AM$ parallel zur Achse, d. i. liegt $A$ in unendlicher Ferne ($a = \infty$), so wird $1/a = 0$, $1/b = 2/r$, oder $b = \frac{1}{2} r$, d. h. der Vereinigungspunkt der mit der Achse parallel einfallenden Strahlen ist vom Spiegel um dessen halben Radius entfernt, oder die Brennweite $f$ ist gleich dem halben Radius. Setzen wir daher in vorstehender Gleichung $\frac{1}{2} r = f$, so wird sie

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}.$$

Eben der Umstand, dafs die Gröfse $k$, welche sich allein auf die jedesmalige Lage des Einfallspunktes $M$ bezieht, aus der Gleichung hinausfiel, drückt aus, dafs alle von einem Punkt ausgehenden Strahlen, wo sie auch den Spiegel treffen mögen, in einem und demselben Punkt wieder zusammentreffen.

Man erkennt ferner, dafs die Gleichung durch Vertauschung von $a$ (Gegenstandsweite) und $b$ (Bildweite) nicht geändert wird, oder dafs Lichtpunkt und Bildpunkt miteinander vertauscht werden können.

Die Gleichung, welche zunächst für Hohlspiegel abgeleitet wurde, gilt übrigens auch für Konvexspiegel, wenn man die virtuelle Brennweite als negativ auffafst, d. h. $-f$ statt $f$ setzt.

Alles von den sphärischen Spiegeln bisher Gesagte gilt jedoch nur, wenn ihre Öffnung klein ist und die einfallenden Strahlen mit der Achse nur kleine Winkel bilden. Bei Hohlspiegeln von gröfserer Öffnung werden z. B. die parallel zur Achse nahe dem Rande auffallenden Strahlen nach einem Punkte der Achse gelenkt, welcher dem Spiegel näher liegt als der für die zunächst der Mitte auffallenden Strahlen giltige Brennpunkt. Die an den verschiedenen

Punkten der Spiegelfläche zurückgeworfenen Strahlen schneiden sich daher nicht mehr in einem, sondern in unendlich vielen Punkten, deren stetige Aufeinanderfolge eine Brennfläche (kaustische Fläche) oder in einer durch die Achse gelegt gedachten Ebene eine Brennlinie (Kaustik) bildet. Man nimmt sie wahr im Innern von Serviettenringen, Tassen und anderen hohlen spiegelnden Flächen in Form von zwei hellen Bogen, die sich beiderseits vom Brennpunkt aus nach der Spiegelfläche hin erstrecken. Um die Randstrahlen eines Bündels von parallelen Strahlen mit den Centralstrahlen in einem Punkte zu vereinen, müfste man dem Spiegel statt der sphärischen eine parabolische Gestalt geben. Man nennt deswegen diesen Fehler, welcher das Zustandekommen scharfer Bilder bei Spiegeln von gröfserer Öffnung verhindert, die „Abweichung wegen der Kugelgestalt“ oder die sphärische Aberration.

326. **Brechung. Totalreflexion.** Lenkt man durch einen kleinen Spiegel $A$ (Fig. 313) ein dünnes Bündel Lichtstrahlen ($AM$) auf die Oberfläche des Wassers in einem Glastrog, so wird ein Teil des einfallenden Lichtbündels dem Reflexionsgesetz gemäfs nach $MN$ zurückgeworfen, ein anderer Teil $MP$ dagegen dringt in das Wasser ein, bildet aber nicht die direkte Fortsetzung des einfallenden Bündels, sondern verfolgt eine steilere, jedoch noch immer geradlinige Bahn. Da das eindringende Lichtbündel sonach am Einfallspunkte eine Knickung oder Brechung (Refraktion) erleidet, so bezeichnet man die Erscheinung mit letzterem Ausdruck. Die Abweichung des gebrochenen Strahlenbündels von der Richtung des einfallenden wird geringer, wenn man das letztere durch Drehung des Spiegels $A$ immer steiler auf die Wasseroberfläche fallen läfst; bei senkrechtem Einfallen erfolgt gar keine Richtungsänderung mehr, sondern die in das Wasser eingedrungenen Strahlen bilden die geradlinige Fortsetzung der einfallenden. Trifft das eingedrungene Bündel senkrecht auf einen kleinen unter das Wasser gebrachten Spiegel $B$, so kehrt es auf dem gleichen Wege $BMA$ zurück. In reiner Luft und in reinem Wasser würden die Strahlenbündel unsichtbar bleiben, sie werden aber wahrnehmbar durch die Erleuchtung von Rauch- oder Staubteilchen, mit welchen man die Luft und die Flüssigkeit absichtlich trübt. Löst man im Wasser eine kleine Menge Eosin (eine fluorescirende Substanz) auf, so leuchtet der gebrochene Strahl mit grünlichem Licht.

Um den Verlauf des einfallenden ($am$ Fig. 314) und des gebrochenen Strahles ($mb$) genau angeben zu können, denkt man sich in dem Einfallspunkt $m$ eine Senkrechte $mc$ errichtet und auch in das Wasser hinein (nach $md$) fortgesetzt; man nennt sie das Einfallslot. Man bemerkt nun zunächst, dafs die Ebene, welche den einfallenden Strahl und das Einfallslot enthält (die Ebene der Zeichnung), stets auch den gebrochenen Strahl in sich aufnimmt. Sie heifst deshalb die Brechungsebene. Die Richtung der Strahlen selbst wird durch die Winkel bestimmt, welche sie mit dem Einfallslot bilden, nämlich durch den Einfallswinkel $i$ und den Brechungswinkel $r$. Jedem Einfallswinkel entspricht ein **Brechungswinkel** von bestimmter Gröfse. Indem man die zusammengehörigen Winkel mifst, findet man z. B. zu dem

| | | | |
|---|---|---|---|
| Einfallswinkel | $0^0$ | den Brechungswinkel | $0^0$ |
| „ | $15^0$ | „ „ | $11^1/_5{}^0$ |
| „ | $30^0$ | „ „ | $22^0$ |
| „ | $45^0$ | „ „ | $32^0$ |
| „ | $60^0$ | „ „ | $40^1/_2{}^0$ |
| „ | $75^0$ | „ „ | $46^1/_2{}^0$ |
| „ | $90^0$ | „ „ | $48^1/_2{}^0$ |

In Fig. 314 ist nach der Angabe dieser kleinen Tabelle zu dem Einfallswinkel $i = 60^0$ der zugehörige Brechungswinkel $r = 40\,^1/_2{}^0$ gezeichnet. Beschreiben wir nun in der Brechungsebene um den Einfallspunkt $m$ einen Kreis mit beliebigem Halbmesser und ziehen von den Punkten $a$ und $b$ aus, in welchem der einfallende und der gebrochene Strahl die Kreislinie schneiden, die Geraden $ac$ und $bd$ senkrecht auf das Einfallslot, so ergibt sich, dafs $bd$ $^3/_4$ ist von $ac$

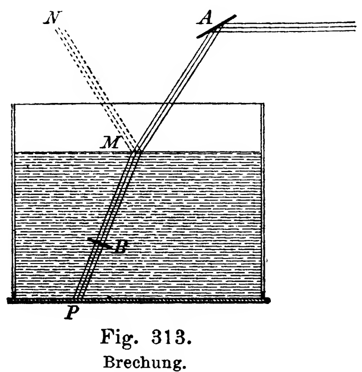


Fig. 313.
Brechung.

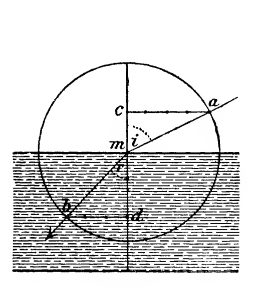


Fig. 314.
Brechungsgesetz.

oder $ac$ $^4/_3$ von $bd$. Verfahren wir ebenso für alle in der obigen Tabelle aufgeführten Winkelpaare, so finden wir stets, dafs die zum Einfallswinkel gehörige Senkrechte $^4/_3$ mal so grofs ist als die zum Brechungswinkel gehörige. Die Zahl $^4/_3$ oder $1\,^1/_3$, welche als Mafs gelten kann für die Stärke der Brechung beim Übergang des Lichts aus Luft in Wasser, heifst das **Brechungsverhältnis** oder der **Brechungsindex** (Brechungskoëfficient, Brechungsexponent) des Wassers.[1]) Aus Luft in Glas werden die Lichtstrahlen stärker gebrochen, und zwar ist hier das Verhältnis jener beiden zum Einfallslot senkrechten Geraden ausgedrückt durch die Zahl $^3/_2$ oder 1,5. In dieser Weise besitzt jeder durchsichtige Körper ein ihm eigentümliches Brechungsverhältnis; für einige derselben sind die Brechungsverhältnisse in der folgenden kleinen Tabelle zusammengestellt:

| | |
|---|---|
| Wasser . . . . . . . . . . | 1,333 |
| Alkohol . . . . . . . . . . | 1,365 |
| Canadabalsam . . . . . . | 1,530 |
| Schwefelkohlenstoff . . . . | 1,631 |

[1]) Der Brechungindex ist das Verhältnis der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten des Lichts im ersten und zweiten Mittel; vgl. 354.

| | |
|---|---|
| Crownglas . . . . . . . . | 1,530 |
| Flintglas von Fraunhofer . . | 1,635 |
| Flintglas von Merz . . . . | 1,732 |
| Diamant . . . . . . . . . | 2,487 |

Bekanntlich nennt man die Senkrechten *ac* und *bd* (Fig. 314), falls der Halbmesser des Kreises = 1 genommen worden ist, die Sinus der zugehörigen Winkel *i* und *r*. Wir können daher das Brechungsgesetz in folgender Weise aussprechen: Der Sinus des Einfallswinkels steht zum Sinus des Brechungswinkels in einem unveränderlichen Verhältnis. Bezeichnet man das Brechungsverhältnis mit *n*, so wird das Brechungsgesetz ausgedrückt durch die Gleichung (Snellius, 1620; Descartes, 1637):

$$\frac{\sin i}{\sin r} = n \text{ oder } \sin i = n \sin r.$$

Bei dem Übertritt des Lichts aus der Luft in einen flüssigen oder festen Körper wird der gebrochene Strahl dem Einfallslot genähert. Kommt aber ein Lichtstrahl in der Richtung *bm* (*BM* Fig. 313) aus dem Wasser, so erleidet er ganz dieselbe Ablenkung wie der in der Richtung *mb* (*MB*) ins Wasser eintretende Strahl; er schlägt beim Austritt aus dem Wasser die Richtung *ma* (*MA*) ein und wird sonach durch die Brechung vom Lot entfernt. Für die zusammengehörigen Winkel *r* und *i* gelten jetzt genau dieselben Werte wie vorhin, nur dafs der Einfallswinkel im Wasser dem früheren Brechungswinkel, der jetzige Brechungswinkel dem früheren Einfallswinkel in der Luft gleich ist. Wenn also $^4/_3$ (oder allgemein *n*) das Brechungsverhältnis für den Übergang aus Luft in Wasser (oder irgend eine andere Substanz) ist, so ist $^3/_4$ (oder $^1/n$) dasjenige für den Übergang aus Wasser (oder aus jener Substanz) in Luft (Gesetz der Reciprocität).

Um den Gang von Strahlen, die aus dem Wasser kommen, zu beobachten, bringen wir unter das Wasser des Glastroges (Fig. 315) einen kleinen drehbaren Spiegel *B*, welcher das durch den Spiegel *A* vertikal nach abwärts gelenkte Lichtbündel auffängt und nach aufwärts gegen die Wasseroberfläche zurückwirft. Läfst man den aus dem Wasser kommenden Strahl *BM* immer schräger auf die Wasseroberfläche fallen, so nimmt auch der austretende Strahl eine immer schrägere Richtung an, indem er mit dem Einfallslot stets einen gröfseren Winkel bildet als jener, und sich der Wasseroberfläche mehr und mehr nähert. Endlich, wenn der Einfallswinkel im Wasser den Wert $48\,^1/_2$ erreicht hat, streift der austretende Strahl an der Wasseroberfläche hin: sein Austrittswinkel beträgt jetzt $90^0$. Einen gröfseren Austrittswinkel kann es aber nicht geben; mit ihm ist die Grenze der Möglichkeit des Austritts erreicht. Wenn daher der Strahl noch etwas schräger von innen auf die Wasseroberfläche trifft, so tritt kein Licht mehr in die Luft hinaus; die Wasseroberfläche erweist sich für so schief auffallende Strahlen als völlig undurch-

dringlich. Man bemerkt zugleich, dafs in dem Augenblick, in welchem diese Grenze überschritten wird, der nach innen zurückgeworfene Strahl $MD$, welcher bis dahin bedeutend lichtschwächer war als der einfallende $BM$ plötzlich an Lichtstärke gewinnt und ebenso hell wird als der einfallende. Während sich nämlich bei den weniger schrägen Strahlen das Licht in einen austretenden und einen in das Wasser zurückgeworfenen Strahl teilte, geht dasselbe jetzt, da der erstere nicht mehr zu stande kommt, ohne allen Verlust in den letzteren über; es wird bei jenem Einfallswinkel sowie bei jedem gröfseren vollständig zurückgeworfen oder total reflektirt.

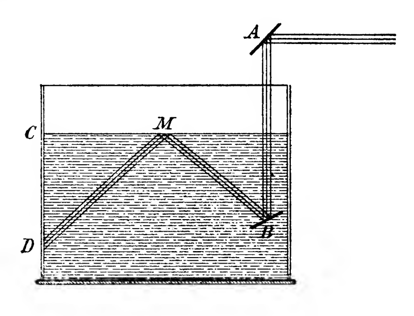



Fig. 315.
Totale Reflexion.

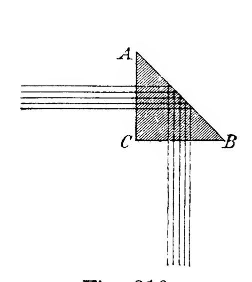



Fig. 316.
Reflexionsprisma.

Totalreflexion kann hiernach nur eintreten, wenn der Strahl, aus einem stärker brechenden Mittel kommend, auf ein schwächer brechendes Mittel trifft. Der Einfallswinkel, bei welchem der Austritt aufhört und die totale Reflexion beginnt, also derjenige, zu welchem ein Austrittswinkel von $90^0$ gehört, heifst der Grenzwinkel; er beträgt für Wasser $48\,^1/_2{}^0$, für Glas $40\,^3/_4{}^0$, für Diamant $23\,^3/_4{}^0$. Da dem Grenzwinkel $r = \gamma$ der Austrittswinkel $i = 90^0$ entspricht, und $\sin 90^0 = 1$ ist, so ergibt sich aus dem Brechungsgesetz $1 = n \sin \gamma$, oder $\sin \gamma = {}^1/n$. Durch Messung des Grenzwinkels kann daher das Brechungsverhältnis eines Stoffes gefunden werden (Wollaston, 1802, F. Kohlrausch, Totalreflektometer, 1878, neuere Totalreflektometer von Abbe, Pulfrich).

Eine Glasfläche, an welcher das Licht vollständig zurückgeworfen wird, erscheint in erhöhtem, metallähnlichem Glanz; sie bildet den klarsten und vollkommensten Spiegel, den man herstellen kann. Man verwendet daher bei optischen Instrumenten häufig ein total reflektirendes Prisma (Reflexionsprisma, Fig. 316), um die Strahlen ohne merklichen Verlust an Lichtstärke in eine andere Richtung zu lenken. Dasselbe besteht aus einem Glasstück, an welches zwei zu einander rechtwinklige Flächen $AC$ und $BC$ und eine dritte Fläche $AB$ angeschliffen sind, welche zu jenen unter Winkeln von $45^0$ geneigt ist. Lichtstrahlen, welche senkrecht auf die Fläche $AC$ fallen, dringen ohne Ablenkung in das Glas und treffen unter einem Einfalls-

winkel von 45° (welcher sonach gröſser ist als der nur $40\,^3/_4{}^0$ betragende Grenzwinkel) auf die Fläche *AB*; hier werden sie, ohne daſs auch nur eine Spur von Licht in die hinter *AB* befindliche Luft austritt, vollständig zurückgeworfen und treten sodann, wieder ohne Ablenkung aus der Fläche *BC* aus.

Legt man gegen die Hypotenusenfläche eines totalreflektirenden Prismas die gleiche Fläche eines ganz gleichen Prismas, so daſs völlige Berührung eintritt, so geht das Licht ohne Reflexion wie durch einen homogenen Glaswürfel hindurch. Ist die Hypotenusenfläche des zweiten Prismas nur in ihrem mittleren Teile eben geschliffen, im übrigen aber schwach konvex, so tritt Berührung nur in dem mittleren Teile ein; durch diesen sieht man dann direkt hindurch, während die äuſseren Teile der Hypotenusenfläche des ersten Prismas totalreflektirtes Licht ins Auge senden. Auf der Anwendung eines derart gestalteten Prismenkörpers beruht das Photometer von Lummer-

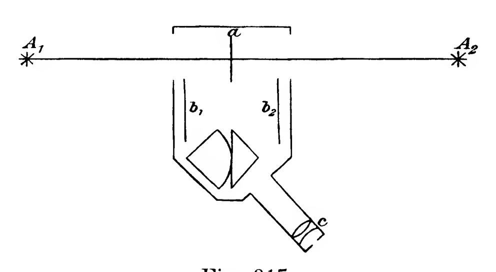



Fig. 317.
Photometer von Lummer-Brodhun.

Brodhun (Fig. 317). Man beleuchtet bei demselben mit den beiden zu vergleichenden Lichtquellen ($A_1$ und $A_2$) je eine weiſse Fläche, nämlich die beiden Seiten des weiſsen Schirmes *a*; das von der einen Seite kommende Licht gelangt nach Reflexion an dem Spiegel $b_1$ durch die Mitte des Prismenkörpers, das andere nach Reflexion an dem Spiegel $b_2$ durch Totalreflexion ins Auge. Die Mitte der Hypotenusenfläche erscheint alsdann dem durch das seitliche Rohr mit der Lupe *c* blickenden Beobachter als ein dunkler oder heller Fleck, je nachdem die erste Fläche dunkler oder heller als die zweite beleuchtet ist, und man kann, indem man die Entfernung der Lichtquelle variirt, mit groſser Schärfe auf Gleichheit der Beleuchtungsstärken einstellen.

Auf Totalreflexion beruht auch Wollastons sog. Camera lucida, eine Vorrichtung zum Abzeichnen von Gegenständen nach der Natur. Sie besteht aus einem vierseitigen Glasstück *abcd* (Fig. 318), das bei *b* einen rechten, bei *d* einen stumpfen Winkel von 135° hat. Ein von dem Gegenstand kommender Lichtstrahl *x*, welcher auf die Vorderfläche *bc* des Glasstückes trifft und in dasselbe eindringt, wird zuerst an der Fläche *cd*, dann an *da* vollständig zurückgeworfen

und gelangt, nachdem er aus der Fläche *ab*, nahe der Kante *a*, ausgetreten ist, von unten, in der Richtung der punktirten Linie kommend, in das Auge. Indem dieses, an der Kante *a* vorbei, auf das zur Aufnahme der Zeichnung bestimmte Papierblatt so nach abwärts blickt, dafs die Hälfte des Sehloches *pp* von dem Glasstück verdeckt wird, nimmt es das Bild des Gegenstandes wahr, als wäre es auf dem Papierblatt entworfen. Man kann daher die Umrisse des Bildes mit der gleichzeitig gesehenen Bleistiftspitze leicht nachzeichnen.

Mittels des Brechungsgesetzes läfst sich zu jedem Einfallswinkel der zugehörige Brechungswinkel (und umgekehrt) leicht bestimmen, sei es durch Rechnung, sei es durch Zeichnung. Letztere könnte nach Anleitung der Fig. 314 ausgeführt werden. Bequemer ist jedoch die in Fig. 319 angewendete Konstruktion. Man beschreibe um den Einfallspunkt *a* zwei Kreise, den einen mit dem Radius 1, den anderen mit dem Radius *n*, wenn *n* das Brechungsverhältnis

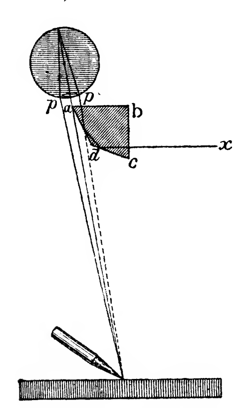



Fig. 318.
Camera lucida.

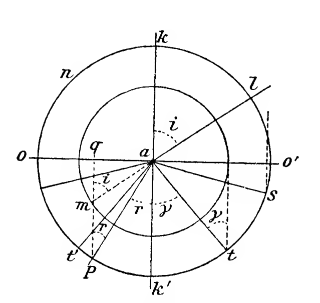



Fig. 319.
Zum Brechungsgesetz.

aus dem ersten Mittel in das zweite ist. Den einfallenden Strahl *l a* verlängere man bis zum Durchschnitt *m* mit dem ersten Kreis und ziehe durch *m* eine Parallele *p m q* mit dem Einfallslot *k a k'*; dann gibt die Verbindungslinie des Punktes *p*, in dem diese Parallele den zweiten Kreis schneidet, mit dem Einfallspunkte *a* den gebrochenen Strahl *a p*. Denn man hat, da Winkel *q m a* gleich dem Einfallswinkel *i* ist, $\sin i = q\,a$; ferner, da Winkel *q p a* gleich dem Winkel *r* ist, auch $n \sin r = q\,a$; also, wie das Brechungsgesetz es verlangt, $\sin i = n \sin r$.

Für einen Strahl *p a*, der aus dem zweiten Mittel kommt, zieht man durch *p*, wo er den zweiten Kreis trifft, eine Parallele zum Lot, welche dem Kreis 1 im Punkte *m* begegnet; die Verbindungslinie von *m* mit *a* liefert alsdann den austretenden Strahl.

Letztere Konstruktion wird unmöglich, wenn, wie bei dem Strahl *s a*, die Parallele zum Lot den ersten Kreis gar nicht trifft. Durch diesen Umstand macht sich die totale Reflexion kenntlich, welche dieser Strahl erleidet.

Wenn die Parallele den ersten Kreis gerade noch am Ende seines horizontalen Durchmessers berührt, wie dies bei dem Strahl *t a* der Fall ist, so tritt der gebrochene Strahl, an der Trennungsfläche der beiden Mittel hinstreifend, längs *a o* aus, und $t\,a\,k' = \gamma$ ist der Grenzwinkel, für welchen sich aus der

Figur $n \sin \gamma = 1$ ergibt. Dreht sich der aus dem ersten Mittel kommende Strahl um 180° aus der Lage *o a* über *k a* bis *o' a*, so dreht sich der im zweiten Mittel zum Lote gebrochene Strahl von *a t* über *a k'* nach *a t'*, um den doppelten Grenzwinkel.

Ein lichtstrahlender Punkt, welcher sich unter Wasser befindet, wird von einem Auge, welches von oben her in das Wasser schaut, nicht an seinem wirklichen Ort, sondern an einer höher liegenden Stelle gesehen, weil die aus dem Wasser austretenden Strahlen stärker auseinander gehen als die im Wasser verlaufenden und daher von einem der Wasserfläche näheren Punkt herzukommen scheinen. Daraus erklärt es sich, dafs ein Gewässer, dessen Grund man sehen kann, weniger tief zu sein scheint, als es wirklich ist. Aus derselben Ursache zeigt sich der unter Wasser befindliche Teil eines lotrecht stehenden Pfahles verkürzt und ein schief ins Wasser gehaltener Stab an der Eintauchungsstelle geknickt. Eine unter Wasser liegende Münze wird, von oben betrachtet, schwach vergröfsert gesehen, weil sie dem Auge genähert und daher unter einem gröfseren Sehwinkel erscheint.

Auch die Gase sind lichtbrechend. Der Brechungskoëfficient aus dem leeren Raume in Luft von 0° und 760 mm Druck beträgt 1,000294 und nimmt ab mit ihrer Dichte.

Da in der Atmosphäre die Dichte der Luft und damit auch die Stärke der Lichtbrechung unter gewöhnlichen Umständen von oben nach unten stetig zunimmt, so wird ein von einem hochgelegenen Punkt schräg nach unten gehender Lichtstrahl immer mehr zum Lote gebrochen, er verfolgt eine nach unten konkave krummlinige Bahn und gelangt schliefslich in steilerer Richtung ins Auge, als wenn er sich im leeren Raume geradlinig fortpflanzte, so dafs jener Punkt an einer höheren Stelle gesehen wird (atmosphärische Strahlenbrechung). Sterne erscheinen dadurch um so mehr erhoben, je gröfser ihr Zenithabstand ist (astronomische Refraktion). Am Horizont beträgt die Erhebung ungefähr 34′, ist also nahezu gleich dem scheinbaren Durchmesser von Sonne und Mond (32′); diese sind also vermöge der Strahlenbrechung schon oder noch sichtbar, bevor sie aufgegangen oder nachdem sie untergegangen sind. — Das Zittern der durch erhitzte Luft gesehenen Gegenstände rührt davon her, dafs die Lichtstrahlen durch Luftströme von ungleicher Dichte bald nach der einen, bald nach der anderen Seite gebrochen werden.

327. **Luftspiegelung** tritt ein, wenn Luftschichten von verschiedener Dichte und daher auch verschiedenem Lichtbrechungsvermögen übereinander lagern. Sind die untersten Luftschichten stark erhitzt und daher weniger dicht als die höher liegenden, was über dem heifsen Sandboden der Wüsten häufig eintritt, so nimmt jeder Lichtstrahl, der von einem hervorragenden Gegenstand gegen den Boden geht, infolge des nach unten abnehmenden Brechungsvermögens der Luft eine immer schrägere Richtung an, beschreibt eine nach oben konkave krummlinige Bahn, biegt endlich um und gelangt nun von unten her in das Auge des Beobachters, als wenn der Strahl an einer wagrechten Spiegelfläche zurückgeworfen wäre. Das Auge sieht daher unterhalb des wirklichen Gegenstandes in umgekehrter Lage ein Spiegelbild desselben, und da auch das Licht

des Himmels an der heifsen Luftschicht zurückgeworfen wird, so sieht diese täuschend aus wie eine Wasserfläche. Eine ähnliche Ablenkung und Zurückwerfung der Lichtstrahlen an verschieden dichten Luftschichten tritt ein, wenn die Luft in den untersten Schichten sehr dicht ist und nach oben hin schnell dünner wird, so über kalten Wasserflächen, besonders über dem Polarmeer. Dann kehrt ein schwach ansteigender Lichtstrahl nach dem Boden zurück, indem er eine Bahn durchläuft, die im umgekehrten Sinne wie in dem obigen Falle gekrümmt ist. Man nimmt dann über dem Gegenstand ein umgekehrtes Bild wahr, zuweilen treten auch mehrere, über einander liegende, abwechselnd umgekehrte und aufrechte Bilder auf. Infolge dieser Krümmung der Lichtstrahlen werden Gegenstände sichtbar, die weit hinter dem wirklichen Horizonte liegen. Von den Seeleuten werden diese Luftspiegelungen Kimmung oder Seegesicht genannt. An den Küsten Siciliens und Calabriens, wo öfter solche Luftspiegelungen auftreten, werden sie im Volksglauben der Zaubermacht einer Fee Morgana zugeschrieben und Fata Morgana genannt. Man kann diese Erscheinungen nachahmen, indem man vorsichtig Alkohol über Wasser, oder reines Wasser über eine Salzlösung schichtet. Durch Diffusion entsteht dann eine Mischung, deren Dichte von unten nach oben stetig abnimmt. Setzt man eine kleine Menge fluorescirender Substanz zu, so kann man den krummlinigen Verlauf der Lichtstrahlen in einem derartigen Mittel direkt sichtbar machen.

328. **Planparallele Platten.** Geht ein Lichtstrahl durch eine von parallelen Ebenen begrenzte (planparallele) Platte (*BB*), so wird er, wie in Fig. 320 erläutert ist, beim Eintritt dem Einfallslot zu-

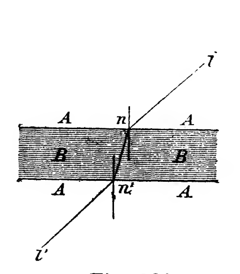


Fig. 320.
Brechung durch eine Platte mit parallelen Flächen.

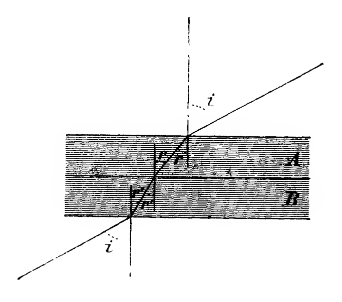


Fig. 321.
Brechung durch zwei parallele Platten.

gelenkt, beim Austritt aber um ebensoviel von demselben weggelenkt. Der austretende Strahl $n'l'$ bildet zwar nicht die geradlinige Fortsetzung des eintretenden $ln$, er bleibt ihm aber parallel; er hat keine Ablenkung aus seiner ursprünglichen Richtung, sondern nur eine seitliche Verschiebung erlitten, welche um so geringer ausfällt, je dünner die Platte ist. Dünne Platten, wie z. B. unsere Fensterscheiben, bringen, wenn sie im übrigen frei von Schlieren sind, nur eine so unmerkliche Verschiebung der Strahlen hervor, dafs man durch sie die Gegenstände fast unverändert in ihrer richtigen Gestalt und Gröfse und an ihrem wirklichen Ort wahrnimmt.

Auch zwei oder mehrere aufeinanderfolgende planparallele Platten (Fig. 321) aus beliebigen durchsichtigen Stoffen ändern die Richtung

der austretenden Strahlen nicht. Aus dieser Thatsache [1]) folgt, dafs das Brechungsverhältnis beim Übertritt eines Lichtstrahles aus einem Mittel $A$ in ein Mittel $B$ ausgedrückt wird durch den Quotienten $n''/n'$, wenn $n''$ das Brechungsverhältnis des Mittels $B$ und $n'$ dasjenige des Mittels $A$ gegenüber der Luft bedeutet.

Denn man hat beim Eintritt des Strahles in die erste Platte $\sin i = n' \sin r$, und beim Austritt aus der zweiten $\sin i = n'' \sin r'$, also $n' \sin r = n'' \sin r'$, oder $\sin r = \frac{n''}{n'} \sin r'$. Da beim Übergang aus der ersten in die zweite Platte $r$ den Einfallswinkel, $r'$ den Brechungswinkel vorstellt, so ist $n''/n' = n$ das zugehörige Brechungsverhältnis, oder es ist $n'' = n'n$.

Als absolutes Brechungsverhältnis eines Körpers bezeichnet man sein Brechungsverhältnis für den Übergang des Lichts aus dem leeren Raum in den Körper; man findet dasselbe hiernach, indem man sein in der Luft bestimmtes Brechungsverhältnis $n$ mit dem Brechungsverhältnis $n' = 1{,}000294$ aus dem leeren Raum in Luft multiplicirt.

329. **Prisma** heifst in der Lehre vom Licht ein durchsichtiger Körper mit zwei keilförmig zu einander geneigten glatten Flächen, durch welche das Licht ein- und austreten kann. Die gewöhnlich

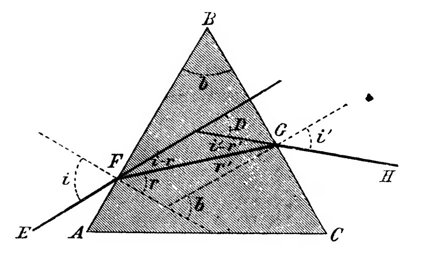



**Fig. 322.**
Strahlengang durch ein Prisma.

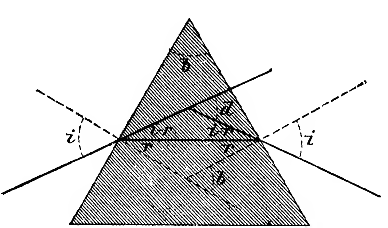



Fig. 323.
Kleinste Ablenkung durch ein Prisma.

gebrauchten Glasprismen haben die Gestalt einer dreiseitigen Säule, deren Querschnitt (Hauptschnitt) ein gleichschenkliges Dreieck $ABC$ (Fig. 322) ist; nur zwei Seitenflächen des Prismas ($AB$ und $BC$, die „brechenden Flächen") brauchen polirt zu sein, die dritte Seitenfläche $AC$, welche dem „brechenden Winkel" gegenüber liegt, sowie die beiden dreieckigen Endflächen werden zweckmäfsig matt geschliffen und geschwärzt. Ein Lichtstrahl, der in der Richtung $EF$ in einem Hauptschnitt auf die eine Seitenfläche trifft, schlägt den nach dem Brechungsgesetz leicht zu zeichnenden Weg $EFGH$ ein, indem er durch die sowohl beim Eintritt als beim Austritt stattfindende Brechung abgelenkt wird. Der Strahl wird, wie die Zeichnung lehrt, von der „brechenden Kante" $B$ weg nach dem dicken Teil des Keiles abgelenkt; ein Auge, das von $H$ aus durch das Prisma blickt, sieht daher die hinter dem Prisma befindlichen Gegenstände, nach der Kante hin verschoben, in der Richtung $HG$.

[1]) Die auch aus 326, Anmerkung, theoretisch folgt.

Der Winkel $D$, welchen die Richtung des eintretenden Strahles $EF$ mit der Richtung $GH$ des austretenden Strahles bildet, gibt die gesamte Ablenkung an, welche der Strahl durch die zweimalige Brechung erlitten hat. Diese Ablenkung setzt sich zusammen aus der Ablenkung $i-r$ beim Eintritt und der Ablenkung $i'-r'$ beim Austritt, wo $i$ und $i'$ die Winkel bedeuten, welche der einfallende und der austretende Strahl, $r$ und $r'$ die Winkel, welche der im Prisma verlaufende Strahl mit den Einfallsloten bildet. Die Gesamtablenkung beträgt demnach $D=i-r+i'-r'$ oder $D=i+i'-(r+r')$. Aus der Zeichnung ist ferner ersichtlich, dafs die Summe $r+r'$ stets dem brechenden Winkel $b$ des Prismas gleich bleibt, oder dafs immer $r+r'=b$, und demnach die Ablenkung $D=i+i'-b$ ist.

Ändert man durch Hin- und Herdrehen des Prismas den Einfallswinkel $i$, so findet man leicht eine Stellung des Prismas, bei welcher die Ablenkung kleiner ist als bei jeder anderen Stellung. Man überzeugt sich leicht, dafs diese kleinste Ablenkung oder das Minimum der Ablenkung ($d$, Fig. 323) stattfindet, wenn der Lichtstrahl mit den beiden brechenden Flächen innerhalb und aufserhalb des Prismas gleiche Winkel bildet, oder wenn er das Prisma symmetrisch durchläuft. Da in diesem Falle $r'=r$ und $i'=i$ ist, so hat man $2r=b$ und $d=2i-b$, und erhält daraus den Einfallswinkel $i=\frac{1}{2}(d+b)$ und den zugehörigen Brechungswinkel $r=\frac{1}{2}b$. Nach dem Brechungsgesetz aber mufs das Brechungsverhältnis $n$ gleich dem Verhältnis der Sinus dieser beiden Winkel sein:

$$n=\frac{\sin \frac{1}{2}(d+b)}{\sin \frac{1}{2}b}.$$

Mifst man daher (mittels Goniometers) den brechenden Winkel $b$ eines Prismas und die kleinste Ablenkung $d$, die es hervorbringt, so kann man nach dieser Formel das Brechungsverhältnis des Stoffes, aus welchem das Prisma verfertigt ist, leicht berechnen. Man gibt daher den Körpern, deren Brechungsverhältnis man durch dieses sehr genaue Verfahren bestimmen will, die Gestalt eines Prismas, was bei Flüssigkeiten dadurch geschieht, dafs man sie in ein Hohlprisma füllt, dessen brechende Flächen durch ebene Glasplatten mit parallelen Flächen, die ja ihrerseits keine Ablenkung hervorbringen, gebildet werden.

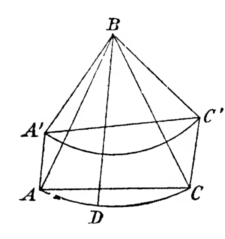


Fig. 324.
Kleinste Ablenkung im Prisma.

Dafs bei symmetrischem Durchtritt die Ablenkung im Prisma am kleinsten sein mufs, läfst sich durch folgende Betrachtung leicht nachweisen. Von der Spitze $B$ (Fig. 324) des brechenden Winkels $ABC$ ($=b$) aus ziehe man die beliebige Gerade $BD$ und zwei Kreisbogen mit den Radien 1 und $n$, deren letzterer die Schenkel des Winkels $b$ in $A$ und $C$ schneidet. Nimmt man den Winkel $ABD$ als Brechungswinkel $r$ an, so ist wegen $r+r'=b$ der Winkel $CBD=r'$. Zieht man jetzt von $A$ und $C$ aus Parallele zu $BD$, welche den Kreis 1 in $A'$ und $C'$ treffen, so sind nach der oben (Fig. 319) gezeigten Kon-

struktion des Brechungsgesetzes $A'BD$ und $C'BD$ die zu $r$ und $r'$ gehörigen Winkel $i$ und $i'$, und $A'BC' = i + i'$. Die Ablenkung $D = i + i' - b$ ändert sich aber nur mit der Winkelsumme $i + i'$ und wird daher ein Minimum, wenn der Winkel $A'BC'$ seinen kleinsten Wert erreicht. Sind die Winkel $r$ und $r'$ ungleich, so ist die Sehne $A'C'$, welche den Winkel $i + i'$ im Kreise 1 spannt, stets größer als die unveränderliche Sehne $AC$, welche den Winkel $r + r' = b$ im Kreise $n$ spannt, und wird der letzteren nur dann gleich, wenn $r = r'$ und deshalb auch $i = i'$ wird. Die Winkelsumme $i + i'$ und mit ihr die Ablenkung ist demnach am kleinsten bei symmetrischem Durchgang des Strahles. Mittels derselben Konstruktion lassen sich überhaupt alle möglichen Fälle der Brechung im Prisma verfolgen.

Bei einem Prisma mit sehr kleinem brechenden Winkel ist für Strahlen, die unter kleinen Einfallswinkeln auf dasselbe treffen, die Ablenkung immer die nämliche und dem brechenden Winkel proportional. Sind nämlich die Winkel $i$ und $i'$ und dann um so mehr die Winkel $r$ und $r'$ sehr klein, so sind die Kreisbogen, welche diesen Winkeln entsprechen, von den Sinus nicht merklich verschieden und können statt dieser gesetzt werden. Dadurch erlangt das Brechungsgesetz die einfachere Gestalt $i = nr$ und $i' = nr'$ (Kepler). Dann aber ergibt sich die Ablenkung $D = i + i' - b = n(r + r') - b = nb - b$ oder $D = (n - 1)b$.

330. **Linsen.** Ein durchsichtiges Glasstück, an welches zwei kugelförmig gekrümmte Flächen (oder eine kugelförmige und eine ebene Fläche) angeschliffen sind, nennt man eine Linse. Von der Fläche gesehen, erscheint ein solches Glasstück kreisrund; in der Mitte quer durchschnitten, würde es eine der in Fig. 325 dargestellten Formen zeigen. Konvex (erhaben oder gewölbt) heißen

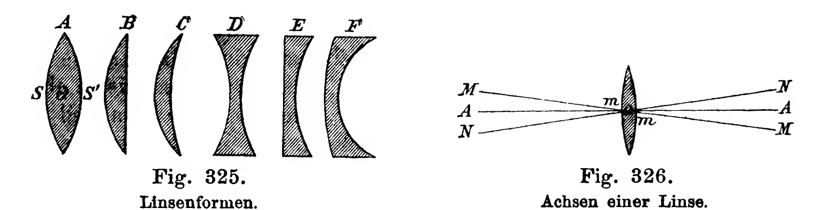



Fig. 325.
Linsenformen.

Fig. 326.
Achsen einer Linse.

solche Linsen, deren Dicke von der Mitte nach dem Rand hin abnimmt; unter ihnen hat die doppelt gewölbte oder bikonvexe Linse ($A$, Fig. 325) in der That die Gestalt des Samens, von welchem diese Gläser ihren Namen erhielten; die plankonvexe Linse ($B$) ist auf der einen Seite gewölbt, auf der anderen Seite flach, die konkavkonvexe ($C$), welche auch Meniskus („Möndchen") genannt wird, ist einerseits gewölbt, andererseits, jedoch weniger stark, hohl geschliffen. Die konkaven oder Hohllinsen sind in der Mitte dünner als am Rand und umfassen ebenfalls drei Formen: die doppelthohle oder bikonkave ($D$), die plankonkave ($E$) und die konvexkonkave ($F$) Linse.

Wir beschränken unsere Betrachtung zunächst auf Linsen, deren Dicke so gering ist, daß man die Scheitel $S$ und $S'$ als mit einem

Punkt $O$ im Innern der Linse, welcher ihr optischer Mittelpunkt heifst, zusammenfallend ansehen kann, und nehmen ferner an, dafs alle vorkommenden Einfalls- und Brechungswinkel sehr klein seien. Jede gerade Linie $MM$, $NN$ (Fig. 326), welche durch die Mitte $O$ einer Linse geht, heifst eine Achse derselben und unter ihnen diejenige ($AA$), welche zu den beiden Flächen der Linse senkrecht steht und daher durch die Krümmungsmittelpunkte der beiden Kugelflächen geht, die Hauptachse. Ein Lichtstrahl, welcher durch die Mitte $O$ geht, erleidet keine Ablenkung, weil er den beiden Linsenflächen an Stellen begegnet, wo sie miteinander parallel sind; er durchläuft die Linse längs einer Achse und wird deswegen Achsenstrahl genannt. Jeder andere Strahl schlägt jenseits eine andere Richtung ein als diesseits, er wird durch die Linse abgelenkt, und zwar in demselben Mafse stärker, als die Stelle, wo er die Linse durchdringt, weiter von der Mitte der Linse entfernt ist. Ihm gegenüber verhält sich die Linse nämlich wie ein Prisma mit kleinem brechenden

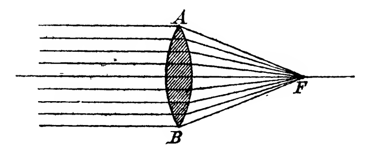



Fig. 327.
Parallele Strahlen gehen nach dem Brennpunkt.

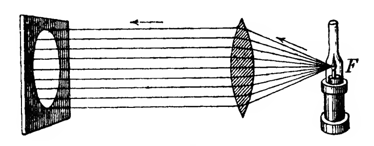



Fig. 328.
Vom Brennpunkt kommende Strahlen werden parallel.

Winkel, dessen Winkel und daher auch seine ablenkende Wirkung nach dem Rande der Linse hin immer gröfser wird. Bei den konvexen Linsen ist der Winkel des Keils von der Hauptachse abgewendet, bei den konkaven ihr zugewendet; da nun ein Prisma einen Lichtstrahl stets von seiner Schneide weg nach dem dickern Teil hin bricht, so werden durch jene die Strahlen nach der Hauptachse zu-, durch diese von der Hauptachse weggelenkt.

Läfst man auf eine konvexe Linse ($AB$, Fig. 327) ein Bündel paralleler Sonnenstrahlen fallen, so werden dieselben so gebrochen, dafs sie alle durch einen und denselben jenseits auf der Achse gelegenen Punkt $F$ hindurchgehen, weil jeder Strahl, je weiter von der Mitte er auf die Linse trifft, um so stärker zur Achse gelenkt wird. Hält man ein Blatt Papier an diesen Punkt, so erscheint er auf demselben als blendend heller Fleck, in welchem nicht nur die erleuchtende, sondern auch die erwärmende Wirkung der auf der Linse aufgefangenen Sonnenstrahlen gesammelt ist; das Papier wird daher bald an dieser Stelle so heifs, dafs es sich entzündet und verbrennt. Aus diesem Grunde nennt man den Punkt $F$ den Brennpunkt (focus) der Linse und die Linse selbst ein Brennglas. Fällt das parallele Strahlenbündel von der anderen Seite her auf die Linse, so erfahren seine Strahlen genau dieselben Ablenkungen und vereinigen sich diesseits in demselben Abstand von der Linse; eine Linse

besitzt daher auf jeder Achse zwei Brennpunkte, welche diesseits und jenseits um die gleiche Strecke, welche man **Brennweite** nennt, von ihr abstehen. Lichtstrahlen, welche von einem Brennpunkt ausgehen, laufen jenseits mit der zugehörigen Achse parallel (Fig. 328).

Kennt man die Brennweite einer Linse, so ist dadurch auch die Ablenkung bekannt, welche jeder vom Brennpunkt auf eine Stelle der Linse fallende Strahl daselbst erleidet; an derselben Stelle erfährt aber jeder andere Strahl, aus welcher Richtung er auch kommen mag, die nämliche Ablenkung (vorausgesetzt, dafs seine Richtung nicht zu sehr von derjenigen der Hauptachse abweicht). Befindet sich z. B. ein leuchtender Punkt in $R$ (Fig. 329) um mehr als die Brennweite von der Linse entfernt, so erleidet der nach dem Rande der Linse gehende Strahl $RA$ die nämliche Ablenkung, welche der vom Brennpunkt $F$ auf dieselbe Stelle $A$ treffende Strahl $EA$ erleiden würde; seine durch den Winkel $RAS$ ausgedrückte Richtungsänderung ist daher gleich dem Winkel $FAN$, und er begegnet jenseits

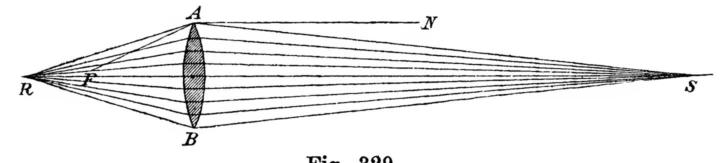



**Fig. 329.**
**Konjugirte Punkte.**

dem ohne Ablenkung durchgehenden Achsenstrahl $RS$ in dem Punkt $S$. In diesem Punkt $S$ müssen sich alle von $R$ aus auf die Linse treffenden Strahlen vereinigen, weil jeder in demselben Mafse stärker der Achse zugelenkt wird, je weiter von der Mitte er auf die Linse trifft. Bringt man ein Blatt Papier an diesen Punkt, so sieht man auf demselben an der Stelle $S$ einen hellen Punkt als **Bild** des Lichtpunktes $R$. Ein solches Bild, welches durch das Zusammenlaufen der Lichtstrahlen entsteht und auf einem Schirm aufgefangen werden kann, nennt man bekanntlich ein **wirkliches** oder **reelles** Bild. Versetzen wir den Lichtpunkt nach $S$, so müssen seine Strahlen, weil sie an denselben Stellen der Linse genau ebenso stark abgelenkt werden wie vorhin, in dem Punkt $R$ zusammenlaufen, wo vorher der Lichtpunkt war. Die Punkte $R$ und $S$ gehören daher in der Weise zusammen, dafs der eine als Bild erscheint, wenn der andere Lichtquelle ist; man bezeichnet sie daher als **zugeordnet** oder „zu einander **konjugirt**". Wenn der eine um mehr als die doppelte Brennweite von der Linse absteht, so ist der andere jenseits um weniger als die doppelte, aber um mehr als die einfache Brennweite von ihr entfernt, und wenn ein Lichtpunkt genau um die doppelte Brennweite von der Linse absteht, so befindet sich auch sein Bild jenseits in der doppelten Brennweite. Die Brennpunkte sind zu den unendlich fernen Punkten der Achse konjugirt.

Befindet sich der Lichtpunkt *T* (Fig. 330) zwischen dem Brennpunkt *F* und der Linse *AB*, so reicht ihr Ablenkungsvermögen nicht mehr hin, die stark auseinanderlaufenden Strahlen (*TA*, *TB*) zusammenlaufend oder auch nur gleichlaufend zu machen; sie vermag nur ihr Auseinanderlaufen zu vermindern. Eine Vereinigung der gebrochenen Strahlen jenseits der Linse findet also nicht statt; sie gehen vielmehr derart auseinander, dafs sie von einem Punkt *V* der Achse herzukommen scheinen, welcher auf derselben Seite der Linse liegt wie der Lichtpunkt, aber weiter als dieser von ihr absteht. Ein von jenseits durch die Linse blickendes Auge sieht also statt des Lichtpunktes *T* einen weiter entfernten Lichtpunkt *V* als Bild desselben. Ein solches Bild, welches auseinander fahrende Strahlen für unser Auge gleichsam in sich tragen, indem sie rückwärts verlängert gedacht in einem Punkt sich schneiden, der uns als ihr Ausgangspunkt erscheint, heifst, wie schon bei den Spiegeln bemerkt wurde, ein scheinbares oder virtuelles Bild. Würde umgekehrt von rechts her (Fig. 330) ein zusammenlaufendes Strahlenbündel auf die Linse fallen, welches nach dem Punkte *V* hinzielt, so bewirkt die Linse, dafs die Strahlen noch stärker zusammengehen und in dem Punkte *T* sich vereinigen; zu dem Punkte *V*, welchen man als „virtuellen“ Lichtpunkt auffassen kann, gehört sonach der Punkt *T* als reelles Bild. Die beiden Punkte *T* und *V* sind also auch in diesem Fall derart einander zugeordnet (konjugirt), dafs der eine das Bild des andern ist. Die Lage konjugirter Punkte läfst sich in einer Zeichnung, wie in Fig. 329 und 330, sehr leicht ermitteln, wenn man den Winkel *FAN* (Fig. 326), welcher die Ablenkung darstellt, die der vom Brennpunkt kommende und somit auch jeder andere Strahl am Rand *A* der Linse erfährt, aus einem Kartenblatt ausschneidet, ihn mit seiner Spitze auf den Punkt *A* legt und um diesen Punkt dreht; die Schenkel des Winkels schneiden dann jede Achse in zwei zusammengehörigen Punkten, deren einer das Bild des andern ist. Hierdurch wird auch anschaulich, dafs Lichtpunkt und Bildpunkt auf der zugehörigen Achse sich stets in gleichem Sinne verschieben.

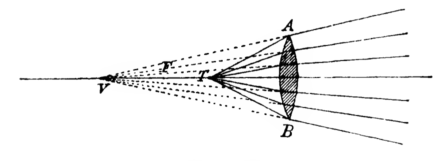


Fig. 330.
Konjugirte Punkte.

Von den Linsen gilt hiernach ähnlich, wie von den Spiegeln, dafs durch einen Punkt gehende (homocentrische) Strahlen auch nach der Brechung durch einen Punkt gehen (homocentrisch bleiben), und dafs daher zur Auffindung des Bildpunktes zwei bequem zu zeichnende Strahlen ausreichen, z. B. nebst dem Achsenstrahl noch der zur Achse parallele Strahl, der nach der Brechung jenseits durch den Brennpunkt geht.

Indem eine Linse von jedem Punkt (*a*) eines Gegenstandes, welcher in der zur Hauptachse senkrechten Ebene *ab* (Fig. 331) liegt,

in der konjugriten Ebene (vgl. 325) $AB$ einen Bildpunkt $A$ erzeugt da, wo die zu $a$ gehörige Achse $aOA$ diese Ebene trifft, entwirft sie von dem Gegenstand $ab$ ein Bild $AB$, welches jenem ähnlich ist, und dessen Durchmesser zu demjenigen des Gegenstandes sich verhält wie die entsprechenden Entfernungen von der Linse. Ist der Gegenstand um mehr als die Brennweite von einer konvexen Linse entfernt, so entsteht das Bild jenseits der Linse durch wirkliche Vereinigung der von jedem Punkte des Gegenstandes ausgehenden Lichtstrahlen; es kann daher auf einem Schirm aufgefangen werden und hat die umgekehrte Lage wie der Gegenstand. Wenn der Gegenstand ($ab$ Fig. 331) diesseits um weniger als die doppelte Brennweite von der Linse absteht, so erscheint sein Bild jenseits umgekehrt und vergröfsert aufserhalb der doppelten Brennweite; bringt man z. B. an die Stelle $ab$ ein gut beleuchtetes durchscheinendes kleines Glasgemälde (oder eine Photographie) in umgekehrter Lage, so bildet sich dasselbe auf einem bei $AB$ aufgestellten Schirm in aufrechter Stellung vergröfsert ab (Zauberlaterne, Skioptikon). Derselbe Fall findet Anwendung bei dem Sonnenmikroskop, wo eine kleine Konvexlinse von kurzer Brennweite von einem kleinen, gewöhnlich

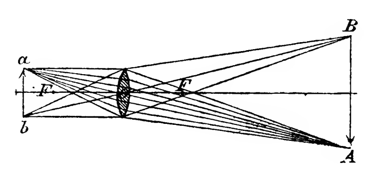


Fig. 331.
Entstehung eines reellen Bildes.

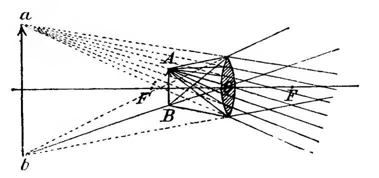


Fig. 332.
Entstehung eines virtuellen Bildes.

zwischen zwei Glasplatten gefafsten Gegenstand, der etwas aufserhalb der Brennweite der Linse aufgestellt und durch Sonnenlicht, das durch eine grofse Linse auf ihm konzentrirt wird, stark beleuchtet ist, auf einem Schirm ein riesiges Bild entwirft.

Befindet sich der Gegenstand bei $AB$ um mehr als die doppelte Brennweite von der Linse entfernt, so entwirft diese jenseits ein umgekehrtes verkleinertes Bild ($ab$). Um diese zierlichen Bilder ungestört von fremdem Licht zu entwerfen, dient ein innen geschwärzter Kasten, die Dunkelkammer oder Camera obscura, in welchen vorn die Linse $O$, hinten bei $ab$ ein Schieber von mattem Glas eingesetzt ist.

Wenn ein Gegenstand ($AB$, Fig. 332) um weniger als die Brennweite von der Linse entfernt ist, so werden die von einem seiner Punkte ($A$) ausgehenden Strahlen nicht mehr in einem jenseitigen Punkt gesammelt, sondern sie treten so aus der Linse, als ob sie von einem diesseitigen Punkt $a$ herkämen, der weiter von der Linse absteht als der Punkt $A$. Ein von jenseits durch die Linse blickendes Auge sieht daher statt des kleinen Gegenstandes $AB$ dessen ver-

grösseres virtuelles Bild *ab*, welches in Beziehung auf den Gegenstand aufrecht steht. Wegen dieser allbekannten Wirkung heissen die konvexen Linsen auch Vergrösserungsgläser. Eine Linse, welche besonders zu dem Zweck bestimmt ist, kleine nahe Gegenstände vergrössert zu zeigen, wird Lupe genannt. Man hält die Lupe dicht vors Auge in einer solchen Entfernung vom Gegenstand, dass dieser sehr nahe am Brennpunkt, aber noch innerhalb der Brennweite, und sein Bild in der bequemen Sehweite liegt. Die erreichte Vergrösserung ist alsdann sehr nahe gleich dem Verhältnis der Sehweite zur Brennweite.

Je kleiner daher die Brennweite der Linse ist, um so stärker nennen wir die Linse. Man nimmt als Mass der Stärke einer Linse den umgekehrten Wert der Brennweite und nimmt als Einheit dieses Masses die Stärke einer Linse, deren Brennweite ein Meter ist. Diese Einheit nennt man Dioptrie. Eine Linse von 20 cm Brennweite hat also eine Stärke von 5 Dioptrien.

Die Hohllinsen wirken gerade entgegengesetzt wie die gewölbten; sie lenken die Strahlen von der Achse weg und zwar um so mehr, je weiter von der Mitte der Linse der Strahl auffällt. Lässt man ein Bündel paralleler Sonnenstrahlen auf eine solche Linse (Fig. 333) fallen, so treten die Strahlen jenseits derart auseinander,

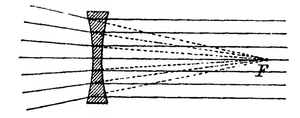



Fig. 333.
Virtueller Brennpunkt einer konkaven Linse.

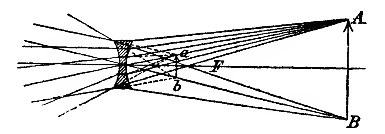



Fig. 334.
Virtuelles Bild durch eine konkave Linse.

dass sie von einem diesseits auf der zugehörigen Achse gelegenen Punkt *F* auszugehen scheinen, welchen man als scheinbaren oder virtuellen Brennpunkt (Zerstreuungspunkt) bezeichnen kann. Jede Hohllinse besitzt auf jeder Achse zwei solche Brennpunkte, welche diesseits und jenseits gleichweit von ihr entfernt sind und für sie dieselbe Bedeutung haben wie die „reellen" Brennpunkte für eine konvexe Linse. Die Brennweite ist nämlich auch hier massgebend für die Ablenkung, welche die Lichtstrahlen an jedem Punkte der Hohllinse von der Achse weg erleiden.

Strahlen, welche von einem Punkt *A* (Fig. 334) eines Gegenstandes auf eine Hohllinse treffen, werden durch dieselbe so gebrochen, als kämen sie von dem auf derselben Seite der Linse näher gelegenen Punkt *a*. Ein von der andern Seite her durch die Linse blickendes Auge empfängt daher die von dem Gegenstand *AB* ausgehenden Strahlen so, als kämen sie von dem verkleinerten, aufrechten virtuellen Bild *ab*. Wegen dieser verkleinernden Wirkung nennt man die Hohllinsen auch wohl Verkleinerungsgläser. Hohllinsen können von Gegenständen niemals andere als virtuelle Bilder liefern,

weil sie die von jedem Punkt ausgehenden Strahlen noch stärker auseinanderlenken oder „zerstreuen“; man nennt sie aus diesem Grund auch **Zerstreuungslinsen**. Nur die gewölbten (konvexen) Linsen vermögen die von einem Punkt ausfahrenden Strahlen, falls dieser Punkt um mehr als die Brennweite von der Linse entfernt ist, jenseits in einem Punkt zu vereinigen oder zu „sammeln“ und werden deshalb auch **Sammellinsen** genannt. Aus denselben Gründen kann man die virtuellen Bilder **Zerstreuungs**-, die reellen **Sammelbilder** nennen.

Der Winkel, welchen die Vorderfläche einer Linse (Fig. 335) im Punkte $K$, der um $KP = k$ von der Achse entfernt ist, mit der gegenüberliegenden Stelle $K'$ der hinteren Linsenfläche bildet, oder der zum Punkte $K$ gehörige brechende Winkel ist gleich dem Winkel $CKL$, welchen die nach $K$ von den Krümmungsmittelpunkten $C$ und $C'$ aus gezogenen Radien $CK = r$ und $C'K' = r'$ miteinander bilden. Der Winkel $CKL$ ist aber, als Aufsenwinkel am Dreieck $CKC'$, gleich $\gamma + \gamma'$. Wenn diese (sowie alle übrigen vorkommenden) Winkel sehr klein und die Dicke der Linse im Vergleich mit ihren Krümmungsradien sehr unbedeutend ist, so kann man (wie oben 325) diese Winkel wie folgt aus-

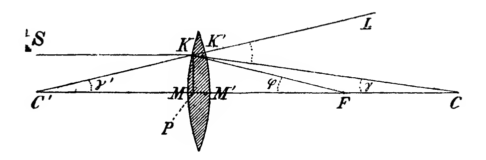



**Fig. 335.**
**Berechnung der Brennweite.**

drücken: $\gamma = k/r$ und $\gamma' = k/r'$. Der im Punkt $K$ wirksame brechende Winkel ist daher $k(1/r + 1/r')$. Nun ist die Ablenkung, welche ein scharfkantiges Prisma hervorbringt, gleich dem $(n - 1)$ fachen seines brechenden Winkels (329). Jeder im Punkte $K$ auf die Linse treffende Strahl erleidet daher die der Entfernung $k$ von der Achse proportionale Ablenkung

$$k(n-1)\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}\right).$$

Der mit der Hauptachse parallele Strahl $SK$ z. B. erfährt, indem er nach dem Brennpunkt $F$ gelenkt wird, die Ablenkung $\varphi = k/FK$ oder $\varphi = k/FM'$ oder $\varphi = k/f$, da man wegen der Kleinheit der Winkel und der geringen Dicke der Linse die Brennweite $FM' = f$ statt $FK$ setzen kann. Man hat daher

$$\frac{k}{f} = k(n-1)\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}\right)$$

und erhält zur Berechnung der Brennweite die Gleichung

1) $$\frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}\right),$$

welche sich nicht ändert, wenn $r$ mit $r'$ vertauscht wird, und dadurch zeigt, dafs die Brennweite zu beiden Seiten der Linse die gleiche ist.

Die Formel zeigt ferner, dafs die Brennweite nicht blofs von der Gestalt, sondern auch von dem Brechungsverhältnis der Linsensubstanz abhängt. Für eine gleichseitige bikonvexe Linse ($r' = r$) aus gewöhnlichem Glas ($n = 1,5$) z. B. findet man daraus $f = r$, für eine plankonvexe Linse ($r' = \infty$) dagegen $f = 2r$.

Ein von dem Punkte $R$ (Fig. 336) der Achse ausgehender und nach dem konjugirten Punkte $S$ gehender Strahl erleidet im Punkte $A$ der Linse die Ablenkung $\gamma = \alpha + \beta$, welche gleich ist der Ablenkung $\varphi$, welche der zur Achse parallele Strahl $NA$, der jenseits durch den Brennpunkt $F$ geht, in demselben Punkte $A$ erleidet. Es ergibt sich sonach $\alpha + \beta = \varphi$. Bezeichnet man nun die Entfernung des Punktes $R$ von der Linse mit $a$, diejenige des Punktes $S$ mit $b$, die Brennweite mit $f$, endlich wie vorhin den Abstand des Punktes $A$

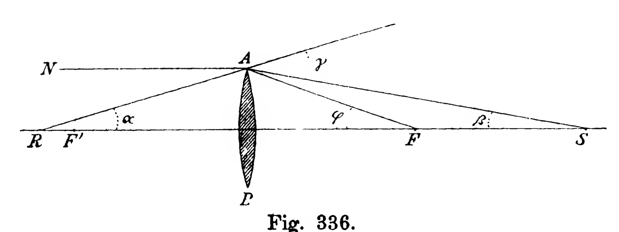



Fig. 336.
**Bestimmung der Lage konjugirter Punkte.**

von der Achse mit $k$, so ist $\alpha = k/a$, $\beta = k/b$, $\varphi = k/f$, folglich $k/a + k/b = k/f$, und man erhält als Beziehung zwischen den konjugirten Punkten die Gleichung:

2) $$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f},$$

welche genau dieselbe ist, wie die früher (325) für die sphärischen Spiegel gefundene, und damit die Analogie ausspricht, welche zwischen diesen und den Linsen besteht.

Die Gleichungen 1) und 2) gelten nicht nur für konvexe Linsen, sondern für jede Linsenform, wenn man darin den Krümmungsradius für eine ebene Fläche unendlich grofs ($\infty$), für eine konkave Fläche negativ, für eine konvexe Fläche positiv nimmt. Je nachdem sich aus der Formel 1) der Wert von $f$ positiv oder negativ ergibt, besitzt die Linse reelle oder virtuelle Brennpunkte.

331. **Brechung durch eine Kugelfläche.** Der Satz, dafs homocentrische (durch einen einzigen Punkt gehende) Strahlen auch nach der Brechung homocentrisch bleiben, gilt nicht nur für die von je zwei Kugelflächen begrenzten Linsen, sondern schon für jede einzelne schwach gekrümmte Kugelfläche für sich.

Denn sind zwei verschiedene durchsichtige Mittel mit den zugehörigen Brechungskoëfficienten $n$ und $n'$ durch eine Kugelfläche $MS$ (Fig. 337) mit dem Mittelpunkt $C$ und Radius $CS = r$ voneinander getrennt, so trifft der vom Lichtpunkt $A$ ausgehende Centralstrahl $AC$ im „Scheitel" $S$ senkrecht auf die Kugelfläche und erleidet keine Ablenkung; der unter dem Winkel $\alpha$ zur Achse $AC$ geneigte Strahl $AM$ dagegen wird im Punkt $M$ nach $MB$ gebrochen und schneidet den Centralstrahl (die Achse) in $B$ unter dem Winkel $\beta$; sein Weg ergibt sich, wenn man zu dem Einfallswinkel $\gamma$, den $AM$ mit dem unter dem Winkel $\varrho$ zur Achse geneigten Lote $CM$ macht, den zugehörigen Brechungswinkel $\delta$ aus dem Brechungsgesetz $n \sin \gamma = n' \sin \delta$ bestimmt. Sind diese sämtlichen Winkel sehr klein, so genügt das vereinfachte Brechungsgesetz $n\gamma = n'\delta$. Aus der Figur aber ergibt sich $\gamma = \alpha + \varrho$ und $\delta = \varrho - \beta$, folglich $n\alpha + n\varrho = n'\varrho - n'\beta$ oder $n\alpha + n'\beta = (n' - n)\varrho$. Bezeichnet man $AS$ mit $a$, $BS$ mit $b$ und den kleinen Bogen $MS$, der als eine zur Achse senkrechte Gerade angesehen werden kann und die Entfernung des Punktes $M$ von der Achse oder dem Scheitel $S$ angibt, mit $k$, so können (wie oben) jene kleinen

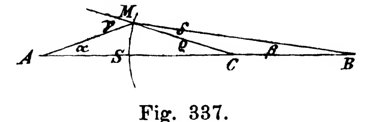



Fig. 337.
Brechung durch eine Kugelfläche.

Winkel wie folgt ausgedrückt werden: $\alpha = k/a$, $\beta = k/b$, $\varrho = k/r$, und man erhält $n\,k/a + n'\,k/b = (n' - n)\,k/r$, oder

$$\frac{n}{a} + \frac{n'}{b} = \frac{n' - n}{r}.$$

Der Umstand, dafs der Bogen $k$ aus der Gleichung herausfällt, besagt, dafs alle durch den Punkt $A$ gehenden Strahlen nach der Brechung durch den Punkt $B$ gehen, unter der Voraussetzung, dafs jener Bogen klein genug ist.

Man kann letztere Gleichung auch so schreiben:

$$\frac{n\,r}{(n' - n)\,a} + \frac{n'\,r}{(n' - n)\,b} = 1,$$

oder, wenn man zur Abkürzung die konstanten Gröfsen

$$\frac{n\,r}{n' - n} = f \text{ und } \frac{n'\,r}{n' - n} = f'$$

setzt:

$$\frac{f}{a} + \frac{f'}{b} = 1.$$

Für $a = \infty$ folgt hieraus $b = f'$, für $b = \infty$ folgt $a = f$, d. h. der Sammelpunkt für achsenparallele Strahlen, die vom unendlich fernen Achsenpunkte links kommen, liegt rechts im Abstande $f'$ vom Scheitel, und ebenso liegt links im Abstande $f$ der zum unendlich fernen Achsenpunkte rechts konjugirte Punkt. Die Strecken $f$ und $f'$ heifsen die erste und die zweite Brennweite. Sie verhalten sich, wie die Brechungsexponenten der Mittel, in denen sie liegen $f/f' = n/n'$.

332. **Linsensysteme.** Beliebig viele Kugelflächen, deren Mittelpunkte auf einer Geraden, der Achse, liegen, und deren Zwischenräume mit beliebigen brechenden Mitteln ausgefüllt sind, bilden ein Linsensystem; denn jede von zwei aufeinander folgenden Kugelflächen eingeschlossene Abteilung kann als eine Linse (von beliebiger Dicke) angesehen werden. Im gewöhnlichen Fall

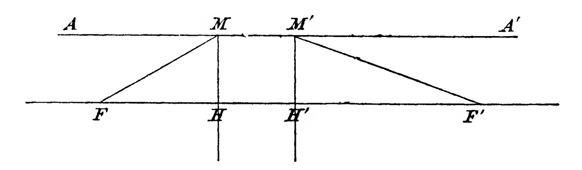



Fig. 338.
**Hauptpunkte.**

unserer optischen Instrumente (Mikroskop, Fernrohr u. s. w.), welche aus Glaslinsen mit gemeinschaftlicher Hauptachse zusammengesetzt sind, bestehen die brechenden Mittel abwechselnd aus Luft und Glas. Unter der Voraussetzung, dafs alle Strahlen nur kleine Winkel mit der Achse bilden, tritt ein im ersten Mittel homocentrisches Strahlenbündel in das letzte Mittel homocentrisch aus, da es ja bei jeder Brechung an den aufeinander folgenden Kugelflächen homocentrisch bleibt. Zu dem im ersten Mittel parallel zur Achse einfallenden Strahl $A\,M$ (Fig. 338) gehöre im letzten Mittel der konjugirte Strahl $M'\,F'$, und dem aus dem letzten Mittel auf entgegengesetztem Wege kommenden achsenparallelen Strahl $A'\,M$ entspreche im ersten Mittel $M\,F$ als konjugirter Strahl. Da jeder Strahl auch in umgekehrter Richtung notwendig denselben Weg einschlägt, so kann man auch sagen, die beiden Strahlen $A\,M$ und $M\,F$, welche im ersten Mittel durch den Punkt $M$ gehen, gehen im letzten Mittel durch den Punkt $M'$; $M$ und $M'$ sind also konjugirte Punkte, und die durch sie senkrecht

zur Achse gelegten Ebenen $MH$ und $M'H'$ konjugirte Ebenen. Es gibt demnach in jedem Linsensystem zwei zur Achse senkrechte konjugirte Ebenen derart, daſs der zu einem Punkte $M$ der einen in der anderen Ebene konjugirte Punkt $M'$ in einer durch $M$ parallel zur Achse gezogenen Geraden $MM'$ liegt, so daſs von einer in der einen Ebene befindlichen Figur in der anderen ein kongruentes gleichliegendes Bild entsteht. Gauſs (1840) nannte diese Ebenen Hauptebenen und ihre Schnittpunkte mit der Achse ($H$ und $H'$) Hauptpunkte. Die Entfernungen $FH = f$ und $F'H' = f'$ der Brennpunkte $F$ und $F'$ von den zugehörigen Hauptpunkten sind die erste und zweite Brennweite des Linsensystems. Bei einer gleichseitigen Bikonvexlinse mit dem Brechungsindex 1,5 liegen die Hauptpunkte im Innern des Glases etwa um $^1/_3$ der Linsendicke von den Scheiteln entfernt.

Sind die Haupt- und Brennpunkte eines Linsensystems gegeben, so ist es leicht, zu einem Punkte $A$ (Fig. 339) im ersten Mittel den konjugirten Punkt $A'$ im letzten Mittel zu finden; denn der zur Achse parallele Strahl $AMM'$ geht

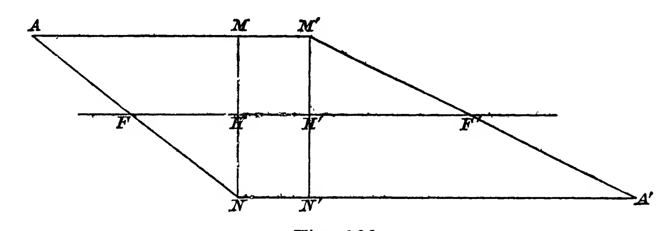



**Fig. 339.**
Konjugirte Punkte bei einem Linsensystem.

von $M'$ durch den Punkt $F'$, der durch den Brennpunkt gehende Strahl $AFN$ läuft von $N$ aus parallel zur Achse und schneidet den Strahl $M'F'$ im gesuchten konjugirten Punkt $A'$. Bezeichnen wir nun die Entfernungen $AM$ und $A'N'$ der Punkte $A$ und $A'$ von den zugehörigen Hauptebenen mit $a$ und $a'$, ferner $MH$ mit $h$, $NH$ mit $h'$, so ergibt sich aus der Betrachtung der Dreieckspaare $FHN$ und $AMN$, $F'H'M'$ und $A'N'M'$:

$$\frac{f}{a} = \frac{h'}{h + h'}, \quad \frac{f'}{a'} = \frac{h}{h + h'},$$

folglich:

$$\frac{f}{a} + \frac{f'}{a'} = 1 .$$

Sind das erste und das letzte Mittel gleichbeschaffen (z. B. Luft), so ist $f' = f$, und die vorstehende Gleichung wird:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f}.$$

Für ein solches Linsensystem (und demnach auch für eine Linse von beliebiger Dicke) gilt also hinsichtlich der konjugirten Punkte dieselbe Gleichung, welche oben für sehr dünne Linsen abgeleitet wurde, wenn man nur die Strecken $a$, $a'$ und $f$ von den Hauptpunkten oder von den Hauptebenen aus zählt.

In der Fig. 340 sei wie in der vorigen zum Punkte $A$ der konjugirte $A'$ gefunden. Man ziehe $MA''$ parallel $M'A'$, und im Viereck $AMA''N$ die Diagonale $AA''$. Zum Punkte $m$, wo diese die erste Hauptebene trifft, ist in der zweiten der Punkt $m'$ konjugirt, wenn man $mm'$ parallel zur Achse zieht. Da aber auch $A'$ zu $A$ konjugirt ist, so ist $m'A'$ der austretende Strahl, welcher dem eintretenden Strahl $Am$ entspricht. Da $mm'$ parallel und gleich $A'A''$ (oder $MM'$), so ist $mm'A'A''$ ein Parallelogramm, folglich $m'A'$ parallel $Am$. Die

Punkte $K$ und $K'$, in welchen die konjugirten Strahlen $Am$ und $m'A'$ die Achse schneiden, heifsen Knotenpunkte; sie haben die Eigenschaft, dafs einem einfallenden Strahl, der durch den ersten Knotenpunkt geht, ein austretender Strahl zugehört, der dem einfallenden parallel ist und durch den zweiten Knotenpunkt geht. Aus der Figur ist ersichtlich, dafs $KK' = HH'$ und $HK = H'K'$

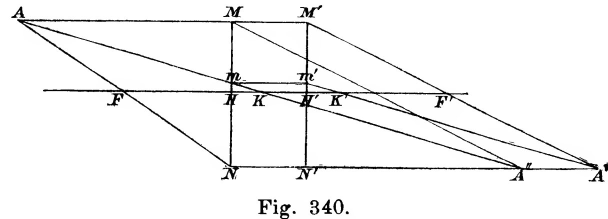



Fig. 340.
Knotenpunkte.

ist. Sind das erste und letzte Mittel von gleicher Beschaffenheit, so fallen die Knotenpunkte mit den Hauptpunkten zusammen. Brennpunkte, Hauptpunkte und Knotenpunkte heifsen die Kardinalpunkte des Linsensystems.

333. **Sphärische Abweichung (Aberration).** Alles bisher Gesagte gilt nur von Linsen von geringer Krümmung oder mit sehr kleiner Öffnung (Apertur); unter der Öffnung einer Linsenfläche versteht man nämlich den Winkel, welchen die von zwei gegenüberliegenden Punkten des Randes nach dem Mittelpunkt der Kugelfläche, von welcher die Linsenfläche ein Teil ist, gezogenen Geraden miteinander bilden. Ist die Öffnung nicht sehr klein, so werden die am Rande der Linse ($VW$, Fig. 341) einfallenden Strahlen verhältnismäfsig stärker abgelenkt als die auf die Mitte treffenden und schneiden daher die Achse in einem Punkt $G$, welcher der Linse näher liegt als der Brennpunkt $F$ der mittleren oder Centralstrahlen; der Abstand $FG$ heifst Längenabweichung. Da das gebrochene Lichtbündel nicht mehr homocentrisch ist, sondern sein engster Querschnitt eine kleine Kreisfläche, den Abweichungskreis, bildet, so kann eine solche Linse nur undeutliche Bilder liefern. Um auch die Randstrahlen nach dem Punkt $F$ zu lenken, müfste man den Linsenflächen eine andere als die kugelförmige Gestalt geben. Man nennt daher diesen Fehler die Abweichung wegen der Kugelgestalt oder die sphärische Aberration. Da aber für jede Entfernung des Lichtpunktes die Linsenfläche wieder eine andere Gestalt haben müfste, so behält man die Kugelflächen dennoch bei und sucht durch geeignete Wahl der Krümmungshalbmesser die Abweichung der Strahlen möglichst klein zu machen.

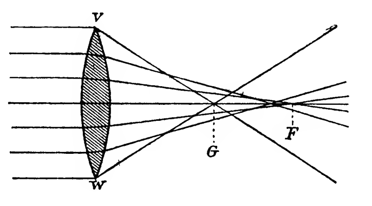



Fig. 341.
Sphärische Aberration.

334. **Mikroskop** nennt man jede Vorrichtung, durch welche man kleine nahe Gegenstände vergröfsert sieht. Da eine konvexe

Linse von kurzer Brennweite (Lupe), wenn man einen Gegenstand, der um weniger als die Brennweite von ihr absteht, durch sie betrachtet, denselben vergrößsert zeigt, so bezeichnet man dieselbe auch als ein einfaches Mikroskop. Eine weit höhere Leistungsfähigkeit besitzt das zusammengesetzte Mikroskop (Jansen, 1590); es besteht dem Wesen nach aus zwei gewölbten Linsen (*ab* und *cd*, Fig. 342), deren eine (*a b*) von sehr kurzer Brennweite dem Gegenstand (Objekt) zugewendet ist und daher Objektiv heifst; sie entwirft von dem kleinen Gegenstand (*r*s), der um etwas mehr als ihre Brennweite

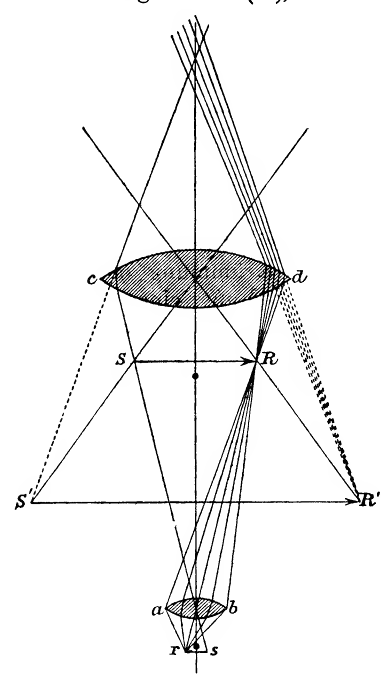



Fig. 342.
Strahlengang im Mikroskop.

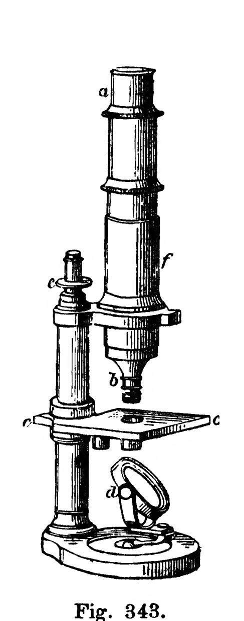



Fig. 343.
Zusammengesetztes Mikroskop.

von ihr absteht, bei *RS* ein umgekehrtes vergröfsertes reelles Bild, welches durch wirkliche Vereinigung der Lichtstrahlen entsteht. Dieses wird durch das Augenglas oder Okular (*cd*), von welchem es um weniger als dessen Brennweite absteht, wie durch eine Lupe betrachtet, als wäre es selbst ein lichtaussendender Gegenstand, und wird daher in *R' S'* als virtuelles Bild nochmals vergröfsert gesehen. Da das schliefslich gesehene Bild *R' S'* die entgegengesetzte Lage hat wie der Gegenstand *rs*, so werden durch das Mikroskop die Gegenstände umgekehrt gesehen. Die Fig. 343 zeigt die äufsere Einrichtung, welche man dem Mikroskop gewöhnlich gibt. Das Okular *a* und das Objektiv *b* sind in ein lotrechtes Messingrohr gefafst, welches

behufs der richtigen Einstellung in der Messinghülse *f* mit sanfter Reibung verschiebbar ist; die feinere Einstellung wird durch Drehen des Schraubenkopfes *e* bewirkt. Der gewöhnlich durchsichtige Gegenstand, von einer Glasplatte getragen, wird auf das Tischchen *cc* gelegt und von unten her durch einen Spiegel *d* beleuchtet.

335. **Fernrohr** heifst jedes Instrument, durch welches man entfernte Gegenstände unter gröfserem Sehwinkel als mit freiem Auge und deshalb gleichsam näher gerückt sieht. Das Keplersche (1611) oder astronomische Fernrohr besteht dem Wesen nach aus zwei konvexen Linsen, einer gröfseren (*oo*, Fig. 344) von längerer Brennweite, welche am vorderen Ende eines Rohres von entsprechender Länge eingeschraubt ist, und einer kleineren (*v v*) von kürzerer Brennweite, welche in eine engere Röhre gefafst ist, die sich in einer am hinteren Ende jenes Rohres angebrachten Hülse verschieben läfst. Die erstere Linse, welche dem zu betrachtenden Gegenstande zugewendet wird, das Objektiv, entwirft in der Nähe ihres Brennpunktes von einem weit entfernten Gegenstand *AB* ein umgekehrtes Bildchen *ab*, indem sie die von einem Punkt *A* des Gegenstandes ausgehenden Lichtstrahlen in dem entsprechenden Bildpunkt *a* vereinigt; durch die zweite Linse, das Okular, wird dieses Bild, weil dasselbe innerhalb deren Brennweite liegt, wie durch eine Lupe betrachtet und in *a′ b′* vergröfsert gesehen. Der Umstand, dafs alle Gegenstände verkehrt gesehen werden, thut der Anwendung des Keplerschen Fernrohrs zu Beobachtungen am Himmel, beim Feldmessen etc. offenbar keinen Eintrag. Seine Brauchbarkeit für diese Zwecke wird wesentlich erhöht durch das Fadenkreuz (Auzout, 1667). In der Okularröhre nämlich, an der Stelle, wo das Bild *ba* entsteht, sind

Fig. 344. Wirkung des Keplerschen Fernrohrs.

Fig. 345. Wirkung des Galileischen Fernrohrs.

zu einander senkrecht zwei feine Spinnenfäden ausgespannt, welche sich genau auf der Achse des Fernrohrs kreuzen. Erscheint das Bild eines entfernten Punktes, z. B. eines Sternes, am Kreuzungspunkt der Fäden, so ist die Achse des Fernrohrs genau auf jenen Punkt gerichtet; und ihre Stellung gibt die vom Auge nach dem Punkt gezogene Visirlinie an. Das Keplersche Fernrohr ist daher als Visirrohr an allen Winkelmefsinstrumenten angebracht. Als Beispiel sei der zur Messung horizontaler und vertikaler Winkel dienende Theodolit angeführt (vgl. Fig. 137). Eine wagrechte um ihren Mittelpunkt drehbare Scheibe, der Alhidadenkreis, trägt ein um eine horizontale Achse drehbares Fernrohr; zwei diametral gegenüberstehende Nonien des drehbaren Kreises zeigen auf einen ihn umgebenden feststehenden Kreisring (Limbus), der, an seinem Umfang in Grade geteilt, zur Messung horizontaler Winkel bestimmt ist. Ein auf der wagrechten Achse des Fernrohrs befestigter Kreis gestattet an einem feststehenden Nonius vertikale Winkel abzulesen.

Während die umgekehrte Lage der Bilder bei Himmelsbeobachtungen und beim Visiren gleichgültig ist, wirkt sie dagegen störend, wenn es sich blofs um das Betrachten entfernter irdischer Gegenstände handelt. Diesem Übelstand wird abgeholfen, indem man das lupenähnlich wirkende astronomische Okular mit dem „terrestrischen“ Okular, einem schwach vergröfsernden, aus vier in eine Röhre gefafsten Konvexlinsen zusammengesetzten Mikroskop, vertauscht, welches das verkehrte Bild nochmals umkehrt; so erhält man das terrestrische oder Erdfernrohr (Schyrl, 1645; de Rheita, 1665). Aufrecht sieht man die Gegenstände auch durch das Galileische oder holländische Fernrohr (Lippershey, 1608, Galilei, 1609). Hier kommt das reelle Bild $ba$ (Fig. 345), welches die konvexe Objektivlinse $oo$ von dem Gegenstand $AB$ zu entwerfen trachtet, gar nicht zu stande, denn die nach jenem Bilde zusammenlaufenden Strahlen treffen auf ihrem Weg dahin die als Okular dienende Hohllinse $vv$, welche sie, wenn $ba$ aufserhalb der Brennweite der Linse $vv$ liegt, derart auseinander lenkt, dafs sie von dem aufrechten Bild $a'\ b'$ herzukommen scheinen. In Fig. 345 ist dieser Gang der Lichtstrahlen für den Punkt $A$ des Gegenstandes deutlich zur Anschauung gebracht. Da ein reelles Bild nicht zustande kommt, so kann kein Fadenkreuz angebracht und daher das Galileische Fernrohr zu Messungen nicht gebraucht werden. Auch hier mufs, wie bei dem Keplerschen Fernrohr, die Brennweite der Okularlinse geringer sein als diejenige des Objektivs. Da die beiden Gläser etwa um den Unterschied ihrer Brennweiten voneinander entfernt sind, so zeichnet sich das Galileische Fernrohr vor dem Kepplerschen, wo Objektiv und Okular um die Summe ihrer Brennweiten von einander abstehen, durch seine geringe Länge aus und eignet sich daher vorzüglich zu schwach vergröfsernden Taschenfernrohren, welche als Operngucker (mit zwei- bis dreimaliger Vergröfserung) und als Feldstecher (20 bis 30 fache Vergröfserung) allgemein bekannt sind. Die Fig. 346 zeigt

die Einrichtung eines gewöhnlichen Theaterperspektivs; in ein Rohr, welches an seinem erweiterten Ende die Objektivlinse *oo* trägt, ist andererseits eine Hülse *bb* eingeschraubt, in welcher das Rohr *c* mit der Okularlinse *aa* verschoben werden kann. Je näher der betrachtete Gegenstand dem Beschauer ist, desto weiter mufs man das Okularrohr herausziehen, um ein deutliches Bild zu erhalten.

Ein drittes Verfahren, um aufrechte Bilder mit einem Fernrohr zu erhalten, besteht darin, dafs man zwischen Objektiv und Okular in der Anordnung des astronomischen Fernrohrs ein System von ebenen spiegelnden Flächen einschaltet, die so gegeneinander gekreuzt sind, dafs sie eine vollständige Bildumkehrung bewirken und zugleich das Licht in die ursprüngliche Sehrichtung zurückwerfen. Diese Möglichkeit ist gegeben durch eine doppelte Anwendung des rechtwinkligen Winkelspiegels. Wir haben oben (323) gesehen, dafs in einem solchen Spiegel durch die zweimalige Reflexion ein Bild entsteht, das umgekehrt ist in Bezug auf die Spiegelkante. Läfst man das aus dem ersten Winkelspiegel tretende Licht, das dem einfallenden Licht entgegenläuft, auf einen zweiten Winkelspiegel fallen, dessen Kante senkrecht zur Kante des ersten steht, so wird das Licht durch diesen in die ursprüngliche Sehrichtung zurückgelenkt und zugleich umgekehrt in Bezug auf die zweite Kante, wodurch eine vollständige Umkehrung erzielt ist. Als Winkelspiegel werden bei diesen Instrumenten rechtwinklige, totalreflektirende Glasprismen verwandt. (Porro, 1851, Doppelfernrohre der Firma Zeifs, 1895.)

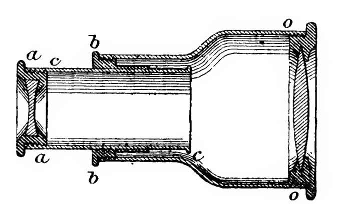


**Fig. 346.**
Theaterfernrohr.

Diese nur aus Glaslinsen zusammengesetzten **Fernrohre** nennt man **dioptrische** Fernrohre oder **Refraktoren**, wobei man den letzteren Namen mit Vorliebe auf grofse astronomische Instrumente dieser Art anwendet. Wegen des durchaus ähnlichen Verhaltens der konvexen Linsen einerseits und der Hohlspiegel andererseits lassen sich auch Fernrohre herstellen, in welchen ein Hohlspiegel die Rolle der Objektivlinse übernimmt; man nennt sie **Spiegelteleskope**, **katoptrische Fernrohre** oder **Reflektoren**.

Aus Fig. 347 ist die Einrichtung des **Newtonschen Spiegelfernrohrs** (1663) ersichtlich. Der in den Boden eines entsprechend weiten, vorn offenen Rohres eingesetzte Hohlspiegel *ss* würde die von einem entfernten Gegenstand kommenden Lichtstrahlen zu einem verkehrten Bildchen bei *a* sammeln; ehe jedoch ihre Vereinigung daselbst stattfindet, werden sie durch einen unter 45° zur Achse des Rohres geneigten ebenen Spiegel *p* zur Seite geworfen, so dafs das Bildchen nach *b* zu liegen kommt, wo es durch eine konvexe Okularlinse wie durch eine Lupe betrachtet werden kann. Die Zurückwerfung des Bildchens nach seitwärts ist deswegen notwendig, weil,

wenn man das Bildchen *a* unmittelbar von vorn zu betrachten versuchte, der Kopf des Beobachters dem Spiegel *ss* das Licht entziehen würde. Bei den Riesenteleskopen von Herschel (1795) und Lord Rosse, deren Spiegel 1—2 m Durchmesser hatten, war ein solches zweites Spiegelchen und somit auch der von ihm herbeigeführte Lichtverlust durch einen einfachen Kunstgriff vermieden. Der Hohlspiegel *ss*, Fig. 348) ist nämlich gegen die Achse des Rohres ein wenig geneigt, so daſs das Bildchen nahe an den Rand des Rohres zu liegen kommt und daselbst durch eine Okularlinse *o* betrachtet werden kann. Dabei tritt freilich der Kopf des Beobachters teilweise vor

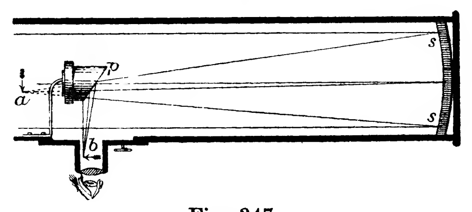



Fig. 347.
Newtons Spiegelfernrohr.

die Öffnung des Rohres, was aber bei dem groſsen Durchmesser des Spiegels von geringem Belang ist. Herschel nannte sein Instrument Front view telescope, d. h. Vornschau-Fernrohr. Bei Benutzung des Newtonschen Spiegelfernrohrs hat der Beobachter den betrachteten Gegenstand zur Seite, bei einem Vornschau-Fernrohr wendet er ihm gar den Rücken zu. Sowohl dieser Umstand, welcher das unmittelbare Anvisiren ausschlieſst, als auch die umgekehrte Lage der Bilder machen diese Instrumente für die Betrachtung irdischer Gegenstände unbequem. Bei dem Gregoryschen Spiegelfernrohr (1663; Fig. 349) sind diese Übelstände vermieden. Der Hohlspiegel *ss* ist

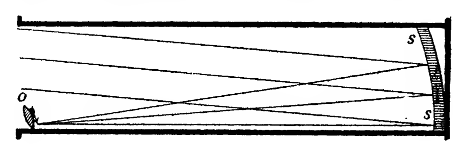



Fig. 348.
Herschels Spiegelfernrohr.

nämlich in der Mitte kreisförmig durchbohrt und die Okularlinse in einer Röhre hinter dieser Öffnung angebracht. Das umgekehrte Sammelbildchen eines entfernten Gegenstandes entsteht bei *a*, etwas auſserhalb der Brennweite eines kleinen Hohlspiegels *v*; dieser entwirft in *b* ein nochmals umgekehrtes, also in Beziehung auf den Gegenstand aufrechtes Bild, welches nun durch das als Vergröſserungsglas wirkende Okular betrachtet wird; die scharfe Einstellung wird durch Verschiebung des Spiegelchens *v* mittels der ein Schraubengewinde tragenden Stange *mn* bewirkt.

Nur bei Herstellung ganz grofser Instrumente bieten die Spiegelfernrohre Vorteile vor den Linsenfernrohren. Die kleineren Spiegelfernrohre waren namentlich früher, als man die Objektivlinsen noch nicht mit wünschenswerter Vollkommenheit herzustellen verstand, allgemeiner verbreitet; sie leiden jedoch an Lichtschwäche und können heutzutage die Konkurrenz mit den Linsenfernrohren nicht mehr bestehen, obgleich auch sie in neuerer Zeit durch Anwendung versilberter Glasspiegel statt der gegossenen Metallspiegel wesentlich verbessert worden sind.

Die Vergröfserung eines Fernrohrs wird ausgedrückt durch das Verhältnis des Sehwinkels $a'mb'$ oder $amb$ (Fig. 344 und 345), unter welchem das Bild $a'b'$ dem dicht an das Okular gehaltenen Auge erscheint, zu dem Sehwinkel $AcB = acb$, unter welchem der Gegenstand ohne Fernrohr gesehen würde. Sind diese Winkel, wie

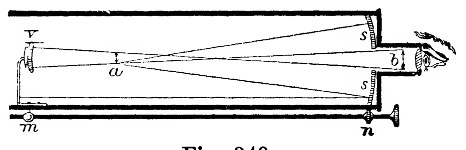



Fig. 349.
Gregorys Spiegelfernrohr.

in Wirklichkeit immer, sehr klein, so verhalten sie sich wie die Abstände des reellen Bildes $ab$ von dem Objektiv einerseits und dem Okular andererseits, oder, da $ab$ sehr nahe an den Brennpunkten dieser Linsen liegt, wie die Brennweite $F$ des Objektivs zur Brennweite $f$ des Okulars. Die Vergröfserung ist also nahezu $= F/f$.

Da das Bild eines Punktes immer auf dem zugehörigen Achsenstrahl liegt, so können durch ein Fernrohr nur solche Punkte gesehen werden, deren Achsenstrahlen noch durch das Okular gehen. Das Gesichtsfeld eines Fernrohrs wird daher von einem Strahlenkegel begrenzt, der den optischen Mittelpunkt des Objektivs zur Spitze und das Okular zur Grundfläche hat.

336. **Farbenzerstreuung** (Dispersion). Durch eine kleine Öffnung $b$ (Fig. 350) des Fensterladens lasse man ein Bündel Sonnenstrahlen in ein verdunkeltes Zimmer eintreten und bedecke die Öffnung mit einem roten Glas. Das Strahlenbündel ist nun rot gefärbt und erzeugt auf einem in seinen Weg gestellten weifsen Papierschirm einen hellen roten Fleck bei $d$. Stellt man nun ein Prisma (bei $s$ im Grundrifs dargestellt) in den Weg des Lichtbündels, so wird dieses von der Kante des Keils weg nach dessen dickem Teil zu gebrochen, und der rote Lichtfleck erscheint auf dem Schirm bei $r$ seitwärts von $d$. Bedeckt man die Öffnung mit einem violetten Glas, so erscheint auf dem Schirm der violette Lichtfleck $v$ weiter zur Seite geschoben als vorhin der rote, und nehmen wir ein grünes Glas, so erscheint jetzt der grüne Lichtfleck zwischen

den beiden Stellen *r* und *v*, an welchen der rote und der violette erschienen waren. Daraus geht hervor, daſs verschiedenfarbige Lichtarten durch das Prisma verschieden stark gebrochen werden und zwar das grüne Licht stärker als das rote, das violette Licht stärker als das grüne. Läſst man nun ohne Anwendung eines farbigen Glases das weiſse Sonnenlicht auf das Prisma fallen, so gewahrt man auf dem Schirm ein von *r* bis *v* sich erstreckendes farbiges Band, welches rot ist an der Stelle, wo vorhin der rote Fleck hinfiel, und violett, wo der violette Fleck sich gezeigt hatte, und in welchem von *r* bis *v* der Reihe nach die Farben Rot, Orange, Gelb, Grün, Hellblau, Dunkelblau, Violett (die bekannten Regenbogenfarben) wahrgenommen werden. Dieses Farbenband wird Spektrum genannt. Aus diesem Versuch muſs geschlossen werden, daſs das weiſse Sonnenlicht aus verschiedenfarbigen Lichtarten zusammengesetzt ist; diese werden durch das Prisma verschieden stark gebrochen, und zwar in der Reihenfolge vom Rot bis zum Violett immer stärker, und, indem sie nach den ihrer Brechbarkeit entsprechenden verschiedenen Stellen des Schirmes gelangen, voneinander getrennt. Diese Zerlegung des weiſsen oder überhaupt des zusammengesetzten Lichts in seine verschiedenfarbigen Bestandteile vermöge deren verschiedener Brechbarkeit nennt man Farbenzerstreuung oder Dispersion. Die einzelnen Farben des Spektrums können nicht weiter zerlegt werden, denn fängt man das Spektrum auf einem mit einem kleinen Loch versehenen Schirm *AB* (Fig. 351) auf, welches nur die Strahlen einer Farbe durchläſst, so werden diese durch ein zweites Prisma *p* bloſs abgelenkt, nicht aber von neuem zu einem Spektrum ausgebreitet. Die Farben des Spektrums sind sonach nicht weiter zerlegbar und werden deshalb einfache oder homogene Farben genannt. Jeder einfachen Farbe entspricht eine bestimmte Brechbarkeit und ist hierdurch eine bestimmte Stelle im Spektrum angewiesen. Es gibt so viele einfache Farben, als es im Bereich des Spektrums Brechbarkeiten gibt, nämlich unzählig viele, welche sich in unmerklichen Übergängen zu einem ununterbrochenen Farbenband aneinander schlieſsen; die oben aufgezählten sieben Farben sind nur die Hauptfarbentöne, welche unser Auge unterscheidet. Wenn das weiſse Licht eine Mischung aus den verschiedenfarbigen Strahlen des Spektrums ist, so müssen diese, wenn man sie wieder zusammenfaſst, weiſses Licht geben; in der That, läſst man das Spektrum auf eine groſse Sammellinse *l* (Fig. 352) fallen, so vereinigt dieselbe den farbigen Strahlenfächer auf einem Schirm bei *f*, wo sie das Bild der Vorderfläche des Prismas entwirft,

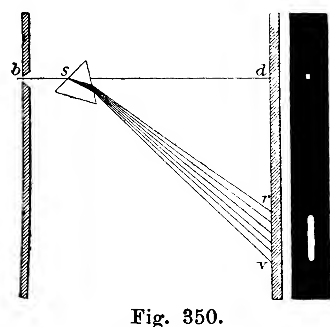



Fig. 350.
Entstehung des Spektrums.

zu einem weifsen Lichtfleck. Der Lichtfleck hört aber sofort auf, weifs zu sein, wenn man eine der Farben aus dem Gemisch wegläfst. Bringt man z. B. ein schmales, schwach keilförmiges Glasstück vor die Linse und fängt damit z. B. die roten Strahlen des Farbenfächers auf, so werden diese zur Seite gelenkt und erzeugen auf dem Schirm seitwärts von *f* ein rot gefärbtes Bild; das Bild *f*, in welchem sich jetzt noch die gelben, grünen, blauen und violetten Strahlen vereinigen, zeigt nun eine grünliche Mischfarbe. Jener rote und dieser grünliche Farbenton müssen, miteinander gemischt (was augenblicklich in dem Punkt *f* geschieht, wenn man den kleinen Glaskeil wieder entfernt), wieder Weifs geben; denn der eine enthält gerade diejenigen Strahlenarten, welche dem anderen zu derjenigen Mischung, die uns als Weifs erscheint, fehlen. Zwei Farben, welche in dieser Art sich zu Weifs ergänzen, nennt man Ergänzungsfarben oder komplementäre Farben. Indem man das Glaskeilchen allmählich durch die ganze Länge des Spektrums schiebt, werden immer andere Farben zur Seite

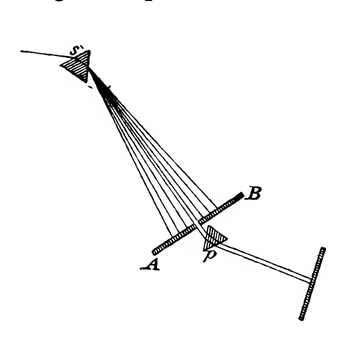



Fig. 351.
Unzerlegbarkeit der Farben des Spektrums.

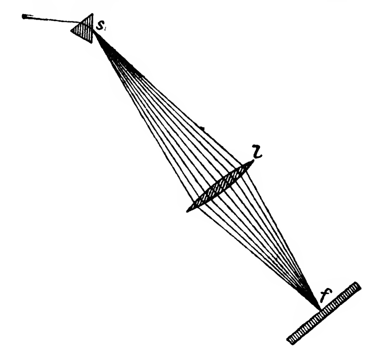



Fig. 352.
Wiedervereinigung der Farben des Spektrums.

gelenkt, und die beiden Bilder auf dem Schirm zeigen nach und nach eine ganze Reihe komplementärer Farbenpaare. Man findet auf diese Weise, dafs rote und grüne, gelbe und blaue, grünlichgelbe und violette Farbentöne sich gegenseitig zu Weifs ergänzen.

Um für unser Auge den Eindruck des Weifsen hervorzubringen, ist übrigens keineswegs das Zusammenwirken aller Farben des Spektrums notwendig, sondern es kann auch durch Vereinigung von nur zwei einfachen Farben Weifs entstehen. Unter den einfachen Farben sind zu einander komplementär Rot und Grünlichblau, Orange und Hellblau, Gelb und Dunkelblau, Grünlichgelb und Violett. Überhaupt findet man für jede Stelle des Spektrums vom roten Ende bis zum Anfange des Grün eine komplementäre Stelle in dem vom Anfang des Blau bis zum violetten Ende reichenden Teile des Spektrums. Nur das spektrale Grün besitzt keine einfache Komplementärfarbe, sondern eine aus Rot und Violett zusammengesetzte, nämlich Purpurrot.

337. **Regenbogen.** In grofsartigem Mafsstabe wird uns die Farbenzerstreuung vor Augen geführt durch den Regenbogen, welchen man, mit dem Rücken gegen die unverhüllte Sonne gewendet, auf einer gegenüberliegenden regnenden Wolkenwand erblickt. Seine Entstehung wird durch folgenden Versuch erläutert. Auf eine mit Wasser gefüllte Hohlkugel *k* (Fig. 353) von Glas fällt in horizontaler Richtung ein Bündel Sonnenstrahlen, dessen Durchmesser gleich demjenigen der Kugel oder gröfser ist. Auf einem Schirme *s s*, welcher vor der Kugel aufgestellt und in seiner Mitte zum Durchlassen der einfallenden Strahlen mit einer Öffnung versehen ist, zeigt sich nun rings um diese Öffnung in einem Abstand von derselben, welcher demjenigen der Kugel von dem Schirme etwa gleichkommt, ein farbiger Kreis, sozusagen ein kreisförmig gebogenes Spektrum, dessen Farben konzentrisch angeordnet sind, so dafs sich das Rot aufsen, das Violett innen befindet. Noch weiter von der Mitte des Schirmes entfernt sieht man noch einen zweiten solchen Kreis, dessen bedeutend lichtschwächere Farben aber die umgekehrte Anordnung zeigen, indem hier das Rot am inneren, das Violett dagegen am äufseren Umfang erscheint. Der erste Kreis entsteht durch Strahlen, welche, nachdem sie in die Wasserkugel eingetreten sind, an deren Hinterfläche zurückgeworfen werden und dann an der Vorderfläche wieder austreten. Bei dieser zweimaligen Brechung und einmaligen inneren Zurückwerfung, wie sie in Fig. 354 angedeutet ist, erleidet jeder Strahl eine Ablenkung aus seiner ursprünglichen Richtung, welche je nach der Entfernung des einfallenden Strahls von dem mittleren Strahl eine andere ist. Unter mittlerem Strahl verstehen wir nämlich denjenigen, welcher nach dem Mittelpunkt der Kugel geht; er wird an der Hinterfläche in sich selbst zurückgeworfen und erleidet sonach k e i n e Ablenkung. Entfernt man sich von diesem mittleren Strahl, so nimmt die Ablenkung anfangs zu, bis sie in einer gewissen Entfernung einen g r ö f s t e n Wert erreicht; von hier an bis zu den äufsersten an der Kugel hinstreifenden Randstrahlen nimmt die Ablenkung wieder ab. Die am stärksten abgelenkten Strahlen, welche auf dem Schirme den Umfang des Farbenkreises treffen, bringen daselbst eine Erleuchtung hervor, welche weitaus gröfser ist, als die eines Punktes der umschlossenen Kreisfläche. Geht man nämlich von den Strahlen, welche die gröfste Ablenkung erleiden, zu dem mittleren Strahl oder zu den Randstrahlen über, so ändert sich die Ablenkung zuerst sehr langsam, später aber rasch. Deswegen bleiben die Strahlen, welche den stärkst abgelenkten beim Einfallen benachbart sind, auch nach dem Austritt ihnen beigesellt und verstärken ihre Lichtwirkung; solche Strahlen dagegen, welche an anderen Stellen der Wasserkugel nahe bei einander einfallen, treten nach der zweiten Brechung weit auseinander und bringen deshalb auf dem Schirme keine erhebliche Beleuchtung hervor. Stellt man daher den Versuch mit einfarbigem Lichte

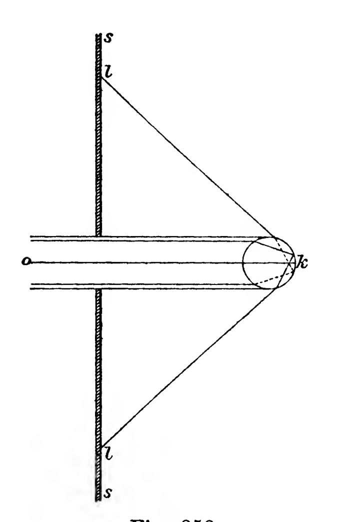



Fig. 353.
**Brechung und innere Zurückwerfung in einer Wasserkugel.**

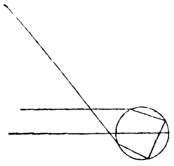


Fig. 354.
**Brechung und zweimalige innere Zurückwerfung in einer Wasserkugel.**

an, indem man z. B. die Öffnung des Heliostaten mit einem roten Glas bedeckt, so reduzirt sich die Erscheinung auf dem Schirme auf eine schwach beleuchtete Kreisfläche, welche von einer sehr hellen roten Kreislinie umgeben ist. Für die roten Strahlen beträgt die gröſste Ablenkung (der Winkel zwischen *o k* und *k l*) etwas mehr als 42°. Die übrigen Strahlenarten werden vermöge ihrer gröſseren Brechbarkeit der Richtung *o k* der einfallenden wieder mehr genähert, und erzeugen Kreise, deren Halbmesser in der Reihenfolge der Brechbarkeit immer kleiner sind. Die Ablenkung der violetten Strahlen beträgt etwa 2° weniger als die der roten. Bei Anwendung des weiſsen Sonnenlichts muſs daher jenes kreisförmige Spektrum mit Rot am äuſseren Umfange entstehen.

Der zweite farbige Kreis entsteht durch Strahlen, welche so, wie Fig. 354 zeigt, zweimal gebrochen und zweimal nach innen zurückgeworfen wurden. Die kleinste Ablenkung, deren solche Strahlen fähig sind, beträgt etwa 51°, für die roten Strahlen etwas weniger, für die violetten etwas mehr.

Jeder fallende Regentropfen wirkt nun ebenso wie die mit Wasser gefüllte Kugel. Ein Auge *O* (Fig. 355), welches nach einer der Sonne gegenüberliegenden regnenden Wolke blickt, wird daher das im Innern der Tropfen einmal reflektirte Licht nur von solchen Tropfen in genügender Stärke empfangen, welche von dem der Sonne entgegengesetzten Punkte *S* des Himmels um einen Winkel von etwa 42° abstehen; die von anderen Tropfen kommenden Strahlen gehen ungesehen am Auge vorbei. Indem die Tropfen *AA'*, welche die roten Strahlen nach *O* senden, von dem Punkte *S* etwas weiter entfernt sind, als die Tropfen *BB'*, von welchen das schwächer abgelenkte violette Licht nach dem Auge geht, erblickt dieses einen um den Gegenpunkt *S* der Sonne beschriebenen Kreisbogen, in welchem die Farben des Spektrums in der Reihenfolge ihrer Brechbarkeit von auſsen nach innen konzentrisch geordnet sind — den ersten oder Hauptregenbogen. Der viel blassere zweite oder Nebenregenbogen mit entgegengesetzter Farbenfolge ist um einen Winkel von 51° vom Punkte *S* entfernt; er entsteht durch die Strahlen, welche wie in Fig. 354 in den Regentropfen nach zweimaliger Brechung und zweimaliger Zurückwerfung eine möglichst kleine Ablenkung erfahren haben. Der Zwischenraum zwischen beiden Bogen erscheint dunkler als der übrige Teil des Himmels, weil von ihm aus keine Strahlen, welche in den Tropfen ein- oder zweimal zurückgeworfen worden sind, das Auge treffen können.

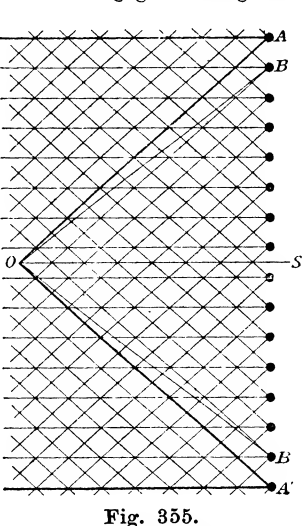


**Fig. 355.**
Entstehung des Regenbogens.

Je höher die Sonne über dem Gesichtskreis steht, desto kleiner ist das dem Beobachter sichtbare Bogenstück. Es ist gar kein Regenbogen mehr sichtbar, wenn die Höhe der Sonne gröſser ist als 42°, weil alsdann der ganze Bogen unter den Horizont zu liegen käme. Bei Sonnenauf- und Untergang sieht man beide Bogen als Halbkreise. Nur auf hohen Berggipfeln oder vom Luftballon aus können sie sich als nahezu oder ganz vollständige Kreise zeigen.

338. **Halo** nennt man den hellen Ring, welcher so häufig den Mond, seltener die Sonne, in einem Abstand von 22° umgibt. Er zeigt die Farben des Regenbogens, welche freilich bei dem Mondring nur blaſs und verwaschen erscheinen; die Anordnung der Farben ist jedoch die umgekehrte; das Rot befindet sich innen, das Violett auſsen. Die Erscheinung tritt ein, wenn der Himmel von leichten Federwölkchen wie mit einem halbdurchsichtigen Schleier

überzogen ist, und erklärt sich aus den Wirkungen, welche die feinen Eiskryställchen, aus denen diese Wolken bestehen, auf die Lichtstrahlen ausüben. Die kleinen Eisnadeln haben die Form regelmäſsiger sechseitiger Säulen, so daſs je zwei weder benachbarte noch parallele Flächen einen Winkel von 60° miteinander bilden. Durch jedes derartige Flächenpaar erleiden die Lichtstrahlen eine Ablenkung und Farbenzerstreuung wie durch ein Prisma. In einer gewissen Stellung, wenn nämlich der Lichtstrahl zur Kante des Prismas senkrecht ist und mit den Flächen gleiche Winkel bildet, ist die Ablenkung kleiner als in jeder anderen Stellung. Für ein Eisprisma von 60° beträgt nun die kleinste Ablenkung 22°. Wenn daher in der Luft unzählige solcher kleiner Eisprismen in allen möglichen Stellungen schweben, wird das Auge nur aus solchen Richtungen gebrochenes Licht empfangen können, welche um mehr als 22° von dem hellen Gestirn abstehen; der innerhalb des Kreises von 22° Halbmesser gelegene Raum wird von gebrochenen Strahlen nicht erleuchtet und erscheint daher vergleichsweise dunkel. Die Stellung der kleinsten Ablenkung ist vor anderen Stellungen noch dadurch ausgezeichnet, daſs ein in dieser Lage befindliches Prisma ziemlich weit nach der einen oder anderen Seite gedreht werden kann, ohne daſs sich die Ablenkung der gebrochenen Strahlen merklich ändert. Unter den unzähligen Eiskryställchen befinden sich gewiſs viele genau in der Stellung der kleinsten Ablenkung; aber eine noch weit gröſsere Anzahl wird zwar nicht genau, jedoch nahezu in dieser Stellung sein. Diese wie jene lenken die gebrochenen Strahlen nach einer einzigen Richtung, aus welcher nun das Auge durch das Zusammenwirken sehr vieler Strahlen einen lebhafteren Lichteindruck empfängt als aus jeder andern Richtung. Da die verschiedenen im weiſsen Licht enthaltenen Farben verschieden stark gebrochen werden, so ist der so entstandene helle Ring regenbogenartig gefärbt, und zwar befindet sich das am wenigsten abgelenkte Rot an seinem inneren Rand. Indem die Eisnadelchen, der Schwere gehorchend, langsam herabsinken, stellen sie sich bei ruhiger Luft mit ihrer Längsrichtung lotrecht, weil sie in dieser Lage den kleinsten Luftwiderstand erfahren. In mit Eisnadeln erfüllter ruhiger Luft werden daher lotrecht gestellte in vorwiegender Zahl vorhanden sein. Der Ring zeigt daher häufig an den beiden Punkten seines Umfangs, welche ihr Licht von lotrecht gestellten Prismen empfangen, nämlich an den Endpunkten seines wagrechten Durchmessers, einen besonders hellen Glanz. Diese beim Sonnenring mit lebhaften Regenbogenfarben leuchtenden Flecke werden N e b e n s o n n e n genannt. Seltener als der Halo von 22° wird ein anderer von 46° gesehen, welcher sich nebst anderen ähnlichen Erscheinungen ebenfalls aus den Brechungen des Lichts in den Eisprismen erklärt. In den Polargegenden, wo die Atmosphäre sehr häufig mit Eisnadeln erfüllt ist, zeigen sich die Halos sowohl um Sonne als Mond sehr schön ausgebildet. In unseren gemäſsigten Gegenden zeigt sich der Ring um den Mond öfter, weil bei Tage die Helligkeit der Sonne und des Himmels der Wahrnehmung schwächerer Erscheinungen dieser Art hinderlich ist. Sehr schön lassen sich diese Ringe nachahmen, indem man in einer koncentrirten Alaunlösung durch Zusatz von etwas Alkohol eine Ausscheidung von kleinen, in der Flüssigkeit schwebenden Alaunkrystallen bewirkt (Cornu). Blickt man durch eine solche, von schwebenden Alaunkrystallen erfüllte Lösung nach einer Lichtquelle, so sieht man sie von einem hellen Ringe nach Art eines Halos umgeben.

339. **Reines Spektrum.** Wird das Spektrum in der oben angegebenen Weise erzeugt, indem man ein durch ein kleines Loch eingelassenes Bündel Sonnenstrahlen durch ein Prisma ablenkt, so erhält man die einfachen Farben nicht vollkommen voneinander getrennt; da nämlich jede einfache Farbe ihr eigenes Sonnenbild (317) erzeugt, welches der zugehörigen Brechbarkeit entsprechend abgelenkt ist, so greifen diese Sonnenbilder wegen ihrer runden Gestalt mit ihren Rändern übereinander und vermischen sich teilweise. Um ein r e i n e s  S p e k t r u m zu entwerfen, läſst man die Strahlen durch

einen schmalen Spalt (Wollaston, 1802, Fig. 356, von oben gesehen) auf eine von ihm um mehr als Brennweite entfernte Sammellinse fallen, welche für sich auf einem in geeigneter Entfernung aufgestellten Schirm ein scharf gezeichnetes reelles Bild des Spalts entwerfen würde; vor oder hinter die Linse bringt man das Prisma mit zum Spalte paralleler Kante in die Stellung der kleinsten Ablenkung; denn nur in dieser Stellung gibt das Prisma vollkommene Bilder. Jeder einfachen Farbe entspricht alsdann ein abgelenktes Bild des Spalts, und indem sich die unzähligen schmalen Spaltbilder nebeneinander legen, greifen sie um so weniger übereinander und bilden

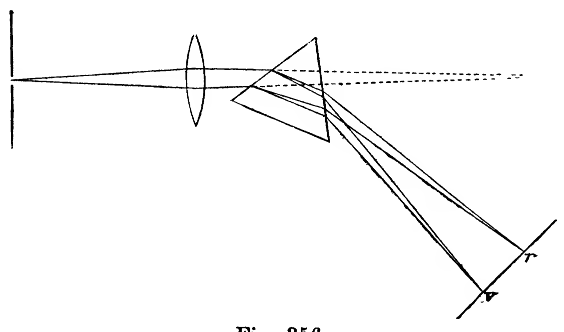



Fig. 356.
Darstellung eines reinen Spektrums.

sonach ein um so reineres Spektrum, je schmaler der Spalt ist. Ein reines Spektrum erblickt man auch, wenn man durch ein Prisma, mit bloſsem Auge oder durch ein Fernrohr, nach einem engen Spalt sieht, welcher mit der Kante des Prismas parallel ist. Betrachtet man aber eine weite Öffnung, so würde, wenn man sich dieselbe in lauter schmale, zur Kante des Prismas parallele Streifen zerlegt denkt, jeder dieser Streifen für sich ein Spektrum geben; indem sich diese Spektra übereinander legen, entsteht ein in die Länge gezogenes Bild der Öffnung, welches am weniger abgelenkten Ende rot, am stärker abgelenkten violett, in der Mitte aber, wo sich sämtliche Farben mischen, weiſs ist.

340. **Fraunhofersche Linien.** In einem auf diese Weise dargestellten reinen Sonnenspektrum gewahrt man eine Reihe feiner dem Spalt paralleler dunkler Linien, welche man nach Fraunhofer, der sie zuerst (1817) genauer untersuchte, Fraunhofersche Linien nennt. Sie sind in ungleichen Abständen über das ganze Spektrum verteilt; viele sind sehr fein und schwieriger wahrnehmbar, andere sind kräftiger und fallen leichter ins Auge. Ihre Entstehung ist von dem Stoff des Prismas unabhängig, denn sie zeigen sich mit gleichem Aussehen und in gleicher Anordnung in jedem Sonnenspektrum; sie sind sonach nichts anderes als schmale Lücken in der Farbenreihe des Spektrums, aus deren Vorhandensein geschlossen werden muſs,

dafs die ihnen entsprechenden einfachen Lichtarten im Sonnenlicht fehlen. Sie bilden innerhalb der allmählichen Farbenübergänge des Spektrums willkommene Merkzeichen, welche immer denselben einfachen Lichtarten entsprechen und uns in den Stand setzen, jede Stelle des Spektrums bestimmt zu bezeichnen und jederzeit mit Sicherheit wieder aufzufinden. Fraunhofer hat acht der hervorragendsten mit den Buchstaben *A* bis *H* bezeichnet (Fig. 357 und Spektraltafel 1). Die Linie *A* liegt im äufsersten dunkeln Rot, *B* im Hochrot, *C* zwischen Rot und Orange, *D* zwischen Orange und Gelb, *E* im Gelbgrün, *F* zwischen Grün und Blau, *G* zwischen Dunkelblau

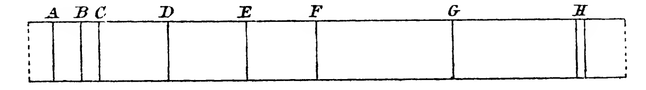



Fig. 357.
Sonnenspektrum mit Fraunhoferschen Linien.

und Violett, die Doppellinie *H* gegen das Ende des Violett. Durch die Fraunhoferschen Linien wurde es zuerst möglich, die Brechungsverhältnisse verschiedener Stoffe für ganz bestimmte Stellen des Spektrums, nämlich für die Linien *B* bis *H* selbst, genau zu bestimmen, und dadurch gewannen diese Linien für die praktische Optik eine hohe Bedeutung; denn nur auf Grundlage dieser genauen Kenntnis der Brechung und Farbenzerstreuung verschiedener Glassorten wurde es Fraunhofer möglich, Linsen ohne Farbenzerstreuung (342) und sonach auch solche Fernrohre mit bis dahin nicht erreichter Vollkommenheit herzustellen. Für einige Flüssigkeiten und Glassorten sind die für die Linien *B*, *D*, *E* und *H* bestimmten Brechungsverhältnisse in der folgenden kleinen Tabelle angegeben:

| | *B* | *D* | *E* | *H* |
|---|---|---|---|---|
| Wasser . . . . . . . | 1,3309 | 1,3336 | 1,3359 | 1,3432 |
| Alkohol . . . . . . . | 1,3628 | 1,3654 | 1,3675 | 1,3761 |
| Schwefelkohlenstoff . . | 1,6182 | 1,6308 | 1,6438 | 1,7019 |
| Crownglas . . . . . . | 1,5258 | 1,5296 | 1,5330 | 1,5466 |
| Flintglas von Fraunhofer | 1,6277 | 1,6350 | 1,6420 | 1,6711 |
| Flintglas von Merz . . | 1,7218 | 1,7321 | 1,7425 | 1,7895 |

Der Unterschied zwischen den Brechungsverhältnissen der äufsersten Strahlen oder der Linien *B* und *H* kann als Mafs für die Farbenzerstreuung angesehen werden. Während hiernach für Crownglas (d. h. das gewöhnliche zu optischen Zwecken verwendete Glas) die Farbenzerstreuung 0,021 beträgt, macht sie für Flintglas (Bleiglas) 0,043, also ungefähr das Doppelte aus. Als mittleres Brechungsverhältnis nimmt man gewöhnlich dasjenige für die Linie *E* an.

341. **Spektrometer.** Die soeben erwähnten Messungen im Spektrum werden nach der Methode der kleinsten Ablenkung durch Goniometer ausgeführt, welche man deswegen insbesondere S p e k t r o m e t e r (Fig. 358) nennt. Ein (Keplersches) Fernrohr mit Fadenkreuz ist nach der Mitte eines horizontalen Teilkreises gerichtet und mit dessen vertikaler Drehungsachse fest verbunden. Ein zweites mit seiner Achse ebenfalls nach der Mitte des Kreises gerichtetes

Rohr, der Kollimator, trägt an seinem äufseren Ende einen vertikalen Spalt, an seinem inneren Ende eine konvexe Linse, in deren Brennebene der Spalt liegt, so dafs die von einem Punkte des Spaltes kommenden Strahlen die Kollimatorlinse als paralleles Bündel verlassen. Der Spalt ist hierdurch gleichsam in unendliche Ferne gerückt, und wird am Fadenkreuz des auf unendlich eingestellten Beobachtungsrohres deutlich gesehen, wenn die Achsen beider Rohre genau dieselbe Richtung haben (Nullstellung). Bringt man nun das Prisma auf ein kleines Tischchen inmitten des Teilkreises, so mufs man das Beobachtungsrohr samt Teilkreis zur Seite drehen, um das abgelenkte Bild des Spaltes oder vielmehr sein Spektrum wahrzunehmen; durch Drehen des Tischchens läfst sich das Prisma leicht (und zwar für jede Fraunhofersche Linie besonders) in die Stellung der kleinsten Ablenkung bringen, deren Betrag man nach vollbrachter Einstellung des Fernrohrs an den feststehenden Nonien abliest. Es ist ersichtlich, dafs

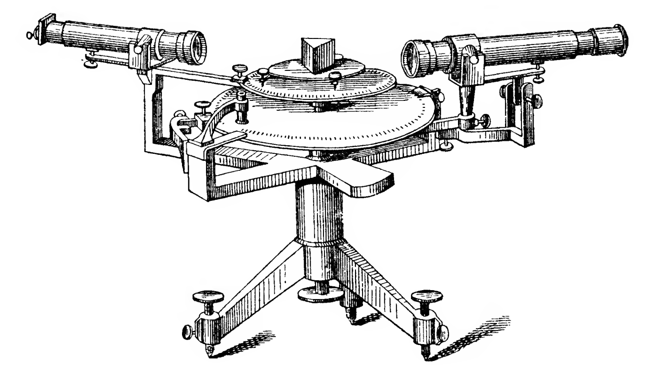


Fig. 358.
Spektrometer.

das Instrument auch als Reflexionsgoniometer (Fig. 302) zur Messung des brechenden Winkels des Prismas gebraucht werden kann, und sonach die beiden Gröfsen, welche zur Berechnung des Brechungsverhältnisses notwendig sind, nämlich kleinste Ablenkung und Prismenwinkel (329), zu bestimmen gestattet.

342. **Achromatismus.** Ein Bündel Sonnenstrahlen wird durch ein Prisma nicht nur abgelenkt, sondern zugleich zu einem farbigen Strahlenfächer ausgebreitet, so dafs statt eines weifsen Lichtflecks auf einem gegenüberstehenden Schirm ein Spektrum erscheint. Die Entfernung der Mitte des Spektrums von der Stelle, wo jener weifse Lichtfleck erscheinen würde, kann als Mafs für die durch das Prisma hervorgebrachte Ablenkung gelten, die Länge des Spektrums als Mafs für seine Farbenzerstreuung. Bringt man nun hinter das Prisma ein zweites ganz gleiches, jedoch so, dafs es seine Schneide nach der entgegengesetzten Seite wendet, so lenkt letzteres das Lichtbündel wieder zurück an seine ursprüngliche Stelle und schiebt den Farbenfächer wieder zusammen; auf dem Schirm erscheint daher ein weifser Lichtfleck in der Richtung der einfallenden Strahlen; das zweite Prisma hat also die durch das erste hervorgebrachte Farbenzerstreuung, zugleich aber auch die Ablenkung wieder rückgängig gemacht. Newton glaubte, dafs auch bei Prismen von verschiedenem Stoff die Farben-

zerstreuung mit der Ablenkung stets gleichen Schritt halte, und dafs es daher unmöglich sei, jene zu beseitigen, ohne auch diese aufzuheben. In Wirklichkeit aber gibt ein Flintprisma ein etwa doppelt so langes Spektrum als ein Crownprisma von gleichem brechendem Winkel, jedoch bei weitem nicht die doppelte Ablenkung. Ein Flintprisma, dessen Winkel etwa halb so grofs ist als derjenige des Crownprismas, bringt daher ein ebenso langes Spektrum, aber eine beträchtlich geringere Ablenkung hervor als dieses und wird, mit ihm in entgegengesetzter Lage vereinigt, die Farbenzerstreuung desselben beseitigen, die Ablenkung dagegen zwar vermindern, jedoch nicht völlig aufheben. Die Vereinigung beider Prismen bildet nun ein Prisma ohne Farbenzerstreuung oder ein achromatisches Prisma, welches auf dem Schirm einen zur Seite gelenkten weifsen Lichtfleck erzeugt. Der Achromatismus wäre vollkommen, wenn die beiden Spektren bei gleicher Gesamtlänge auch im einzelnen sich deckten. Dies ist jedoch bei den älteren Glassorten nicht der Fall; durch das Fraunhofersche Flintglas werden die weniger brechbaren Strahlen mehr zusammengedrängt, die brechbareren weiter auseinandergerückt als durch das Crownglas. Die Folge ist, dafs noch schwache Farbenzerstreuung (das „sekundäre“ Spektrum) übrig bleibt. Im glastechnischen Laboratorium in Jena (Abbe und Schott) werden aber Crown- und Flintglassorten hergestellt, welche durch das ganze Spektrum einen gleichen Gang der Dispersion zeigen, und daher miteinander kombinirt vollkommen achromatische (apochromatische) Prismen liefern.

Infolge der ungleichen Brechbarkeit verschiedenfarbiger Strahlen vermag eine gewöhnliche Sammellinse die Strahlen, welche von einem Punkt ausgehen, nicht wieder genau in einem Punkt zusammenzufassen; denn die stärker gebrochenen violetten Strahlen werden sich in einem der Linse näher gelegenen Punkt $v$ (Fig. 359), die weniger brechbaren roten erst in einem entfernteren Punkt $r$ vereinigen. Da sonach jedem Punkte des Gegenstandes im Bilde nicht ein Punkt, sondern ein Zerstreuungskreis mit farbigem Rande entspricht, so sind die Bilder, welche eine solche Linse entwirft, nicht scharf begrenzt, sondern von farbigen Säumen umgeben. Man nennt diesen Fehler die Farbenabweichung (chromatische Aberration) der Linsen. Ein Fernrohr oder ein Mikroskop mit einer solchen Objektivlinse würde wegen der Undeutlichkeit seiner Bilder nur geringen Wert besitzen. Wirklich brauchbare Linsenfernrohre herzustellen war nicht eher möglich, als bis es gelungen war, Linsen ohne Farbenabweichung zu verfertigen (Dollond, 1757). Das achromatische Prisma zeigt uns den Weg zur Lösung dieser Aufgabe. Um nämlich die Farbenzerstreuung einer Sammellinse aus Crownglas ($AB$, Fig. 360) aufzuheben, bringen wir unmittelbar hinter sie eine Zerstreuungslinse aus Flintglas ($CD$), welche nur eine halb so grofse Ablenkung, aber die gleiche Farbenzerstreuung wie jene hervorbringt und zwar beides in entgegengesetztem Sinn wie jene. Der weifse Lichtstrahl $L$ wird von der

Crownglaslinse in einen Farbenfächer ausgebreitet, dessen roter Strahl die Achse in dem entfernteren Punkt *p*, dessen violetter Strahl sie in dem näheren Punkt *v* trifft. Durch die Flintglaslinse werden die Strahlen wieder von der Achse weggelenkt und zwar dieser um so viel stärker als jener, dafs beide, miteinander und mit den zwischenliegenden Strahlen des Farbenfächers zu einem weifsen Strahl vereinigt, die Achse in dem entfernteren Punkt *p'* schneiden. Die beiden Linsen, miteinander vereinigt (sie werden häufig mittels eines durchsichtigen Kittes, nämlich mit Kanadabalsam, zu einem Stück zusammengekittet), bilden nun eine achromatische Linse, welche alle von einem weifsen Punkt ausgehenden Strahlen auch wieder zu einem weifsen Bildpunkt vereinigt. Die Objektive der Fernrohre, Mikroskope, der photographischen Dunkelkammern sind stets solche

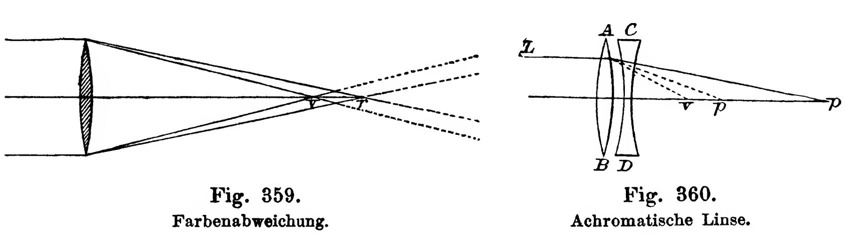



**Fig. 359.**
Farbenabweichung.

**Fig. 360.**
Achromatische Linse.

aus zwei verschiedenen Glassorten zusammengesetzte achromatische Linsenkombinationen, bei welchen durch geeignete Wahl der Krümmungsradien auch die sphärische Abweichung möglichst verringert ist (333). Eine derartige Linsenkombination heifst aplanatisch. Auch die Okulare der Fernrohre und Mikroskope bestehen aus mehreren Linsen gleicher Glassorte, deren Radien und Abstände so gewählt sind, dafs die Abweichungen (sphärische und chromatische) möglichst gering ausfallen.

Zu einem Crownglasprisma kann man leicht ein Flintprisma herstellen, welches einen bestimmten farbigen Strahl, z. B. das Grün der Fraunhoferschen Linie *E*, ebenso stark ablenkt wie jenes, und daher, in entgegengesetzter Lage mit ihm vereinigt, die Ablenkung dieser Strahlenart aufhebt. Da aber die Ablenkung der übrigen farbigen Strahlen nicht gleichzeitig aufgehoben ist, so geben die beiden zusammen eine geradsichtige Prismenkombination (à vision directe, Amici, 1860), welche das Spektrum nicht zur Seite lenkt, sondern in der Richtung der einfallenden Strahlen entwirft.

343. **Spektralapparate.** Zur subjektiven Beobachtung und genaueren Untersuchung des Spektrums dienen die verschiedenen Arten der Spektroskope oder Spektralapparate. Im Bunsenschen Spektroskop (Fig. 361) steht ein Flintglasprisma *P*, dessen Seitenflächen einen Winkel von 60° miteinander bilden, auf einem gufseisernen Gestell. Gegen das Prisma sind drei wagrechte Röhren *A*, *B* und *C* gerichtet. Die erste (*A*), das Spaltrohr oder der Kolli-

mator, trägt an ihrem dem Prisma zugewendeten Ende eine Sammellinse *a* (Fig. 362, Grundrifs), in deren Brennebene sich am anderen Ende ein lotrechter und sonach mit der Schneide des Prismas paralleler Spalt *l* befindet. Die von einem Punkte des erleuchteten Spalts ausgehenden Lichtstrahlen werden durch die Linse *a*, weil sie aus ihrer Brennebene kommen, unter sich parallel gemacht, und werden, nachdem sie durch das (für mittlere Strahlen) auf kleinste Ablenkung gestellte Prisma abgelenkt worden sind, durch das Objektiv *b* des Fernrohrs *B* in dem zugehörigen Brennpunkt vereinigt. Sind z. B. die durch den Spalt einfallenden Strahlen einfach rot, so entsteht bei *r* ein schmales rotes Bild des Spalts, gehen aber auch violette Strahlen von dem Spalt aus, so werden diese durch das Prisma stärker abgelenkt und erzeugen ein violettes Spaltbild bei *v*. Dringt

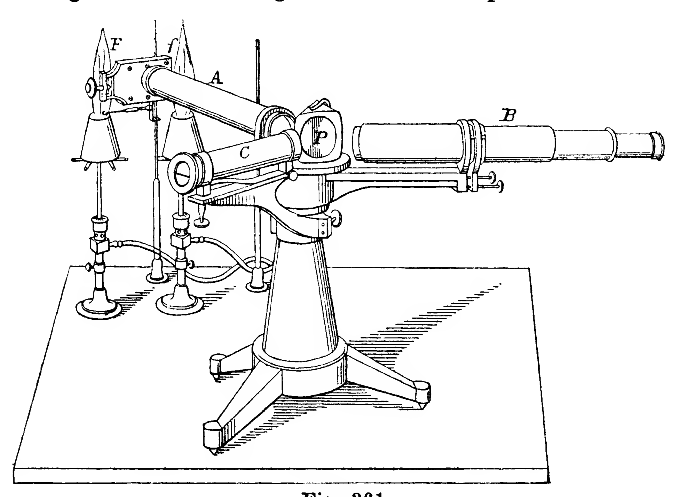



**Fig. 361.**
**Bunsens Spektroskop.**

weifses Licht, welches aus unzählig vielen verschiedenfarbigen und verschieden brechbaren Lichtarten zusammengesetzt ist, durch den Spalt ein, so legen sich die unzählig vielen entsprechenden Spaltbilder in ununterbrochener Reihenfolge nebeneinander und bilden in der Bildfläche ein vollständiges Spektrum *rv*, welches nun durch die Linse *o* wie durch eine Lupe betrachtet wird. Um das Spektrum mit einem Mafsstab vergleichen zu können, trägt ein drittes Rohr *C* (das Skalenrohr) an seinem äufseren Ende bei *s* einen kleinen photographischen Mafsstab (Skala) mit durchsichtigen Teilstrichen, an seinem inneren Ende aber eine Linse *c*, welche um ihre Brennweite von dem kleinen Mafsstab entfernt ist. Durch eine Lampenflamme wird diese Skala erleuchtet. Die von einem ihrer Punkte ausgehenden Strahlen, durch die Linse *c* parallel gemacht, werden an der Vorderfläche des Prismas auf die Linse *b* des Fern-

rohrs zurückgeworfen und von dieser in dem entsprechenden Punkte der Bildfläche *rv* vereinigt. Durch das Augenglas *o* des Fernrohrs schauend, erblickt man daher gleichzeitig mit dem Spektrum ein scharfes Bild der Skala, das sich an jenes der ganzen Länge nach wie ein Maſsstab anlegt, so daſs jede Stelle des Spektrums durch den entsprechenden Teilstrich der Skala bezeichnet ist (s. Spektraltafel 1, Bunsensche Skala). — Wegen der Ablenkung, die das Prisma hervorbringt, bilden Spaltrohr und Fernrohr des Bunsenschen Spektroskops einen Winkel miteinander, und die Visirlinie des Instruments ist geknickt. Durch passende Zusammensetzung von Flint- und Crownglasprismen kann man aber geradsichtige Prismen (342), durch welche die Ablenkung der Strahlen, nicht aber ihre Farbenzerstreuung aufgehoben wird, und mit ihrer Hilfe g e r a d s i c h t i g e  S p e k t r o s k o p e herstellen, welche die Lichtquelle unmittelbar anzuvisiren erlauben. Ein solches ist das in Fig. 363 dargestellte Browningsche Taschenspektroskop; bei *s* ist der Spalt, *C* ist eine (achromatische) Linse, *p* der aus drei Flint- und vier Crownglasprismen zusammengesetzte Prismenkörper und *O* die Öffnung fürs Auge.

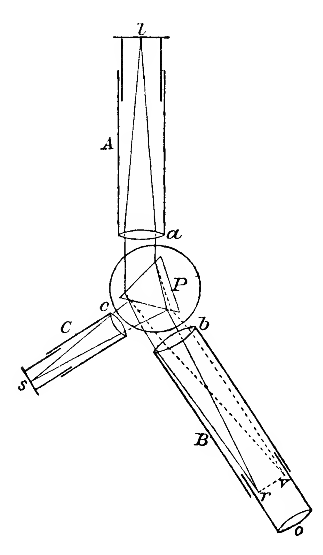



Fig. 362.
Einrichtung des Bunsenschen Spektroskops.

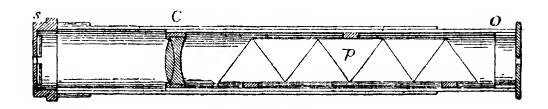



Fig. 363.
Brownings Taschenspektroskop.

344. **Ausstrahlung (Emission).** Über die Zusammensetzung des von einer Lichtquelle ausgestrahlten Lichts erhalten wir Aufschluſs, indem wir dessen Spektrum entweder nach der obigen (339) Methode objektiv entwerfen, oder durch das Spektroskop subjektiv beobachten.

Im Spektrum des Sonnen- oder Tageslichts gewahrt man auch mittels des Spektroskops die dem Sonnenlicht eigentümlichen Fraunhoferschen Linien.

Weiſsglühende f e s t e  u n d  f l ü s s i g e  K ö r p e r, sowie die hell leuchtenden Flammen der Kerzen, Lampen und des Leuchtgases, in welchen **feste Kohlenteilchen** (Ruſs) in weiſsglühendem Zustande schweben, geben

ununterbrochene (kontinuirliche) Spektren ohne dunkle Linien, in welchen alle Farben vom Rot bis zum Violett in stetiger Reihenfolge vertreten sind.

Die Spektren leuchtender Gase und Dämpfe dagegen bestehen bei hoher Temperatur aus einzelnen hellen Linien, Bildern des schmalen Spalts aus homogenem Licht auf dunklem Grunde (Linienspektrum), oder bei niedriger Temperatur aus breiteren, durch dunkle Zwischenräume getrennten Streifen oder Banden (Bandenspektrum). Die Lage und Gruppirung derselben ist durch die chemische Beschaffenheit des gasförmigen Körpers bedingt.

Bringt man z. B. in die schwach leuchtende Flamme *F* (Fig. 361) eines Bunsenschen Brenners eine in das Öhr eines Platindrahtes eingeschmolzene kleine Menge Kochsalz (Chlornatrium), so färbt sich die Flamme goldgelb, und zeigt im Spektroskop eine schmale gelbe Linie (Spektraltafel 3) an ganz bestimmter Stelle. Die Natriumflamme strahlt demnach einfaches gelbes Licht von ganz bestimmter Brechbarkeit aus, welches dem Natriumdampf eigentümlich ist. Jene gelbe Linie im Spektrum verrät daher die Anwesenheit des Natriums, und zwar in den geringsten Spuren. Man braucht z. B. nur neben einer Weingeistflamme, auf welche das Spektroskop gerichtet ist, etwas Staub aufzuwirbeln, so sieht man sofort die helle Natriumlinie aufblitzen, weil die feinen in der Luft schwebenden und überall sich absetzenden Stäubchen Spuren von Kochsalz enthalten. Ein Lithiumsalz in die Bunsensche Flamme gebracht, gibt eine schwache orangegelbe und eine prachtvoll hochrote Linie (Spektraltafel 4); Kaliumsalze zeigen ein schwaches ununterbrochenes Spektrum mit einer hellen Linie im äufsersten Rot und einer anderen im Violett (2). Einen anderen Anblick gewähren die Erdalkalien, Calcium (7), Strontium (8), Barium (9), wenn man ihre Salze, in der Regel die Chloride, in der Flamme eines Bunsenbrenners verflüchtigt; sie zeigen aufser einigen scharfen Linien breitere „Banden“, die nicht das Spektrum der Metalle selbst, sondern ihrer Oxyde darstellen (Verbindungsspektren). Aber, gleichviel ob der Dampf des Metalles selbst oder der seiner Verbindung leuchtet, das ausgestrahlte Licht ist auf alle Fälle charakteristisch für das Metall.

Jeder Stoff ist durch bestimmte, ihm eigentümliche helle Linien gekennzeichnet, welche das von seinem Dampf ausgestrahlte Licht im Spektroskop darbietet. Sind mehrere solche Stoffe in einem Gemisch enthalten, und bringt man dasselbe in der Bunsenschen Flamme zur Verdampfung, so gewahrt man im Spektrum nebeneinander die jedem Stoff eigentümlichen Linien, jede an ihrer bestimmten Stelle, und erkennt sonach mit einem Blick die Gegenwart jener Stoffe in dem zu untersuchenden Gemisch. Dieses von Bunsen und Kirchhoff ausgebildete Verfahren, die einfachen Bestandteile der Körper durch Beobachtung ihres Spektrums zu erforschen, nennt man „Spektralanalyse“. Bunsen fand durch dieses Verfahren

die bis dahin unbekannten Alkalimetalle Cäsium (5) und Rubidium (6) auf, und andere Forscher entdeckten auf demselben Wege das Thallium (10), Indium und Gallium. Stoffe, zu deren Verdampfung die Hitze der Bunsenschen Flamme nicht ausreicht, verflüchtigt man im elektrischen Funken, indem man die Entladung eines Funkeninduktors, verstärkt durch eine nebengeschaltete Leidener Flasche, zwischen Polspitzen, die aus dem zu untersuchenden Metall bestehen oder mit der zu prüfenden Verbindung überzogen sind, übergehen läßt. Die Spektren der schweren Metalle, welche auf diese Weise sichtbar werden, sind durch zahlreiche, jedem Metall eigentümliche helle Linien ausgezeichnet; im Spektrum des Eisens z. B. haben Kayser und Runge mehr als 4500 Linien gemessen. Um ein Gas leuchtend zu machen, läßt man die Entladung des Funkeninduktors mittels der eingeschmolzenen Platindrähte *a* und *b* (Fig. 364) durch eine Geißlersche Spektralröhre gehen, welche das Gas in verdünntem Zustande enthält. Befindet sich z. B. Wasserstoffgas in der Röhre, so leuchtet ihr mittlerer enger Teil mit schön purpurrotem Lichte, dessen Spektrum aus drei hellen Linien besteht: einer roten, welche an derselben Stelle liegt wie die Fraunhofersche Linie *C*, einer grünblauen, die mit *F*, und einer violetten, die mit einer dunklen Linie des Sonnenspektrums nahe bei *G* der Lage nach übereinstimmt.



Fig. 364. Spektralröhre.

345. **Absorption des Lichts.** Entwirft man mittels Spalt, Linse und Prisma auf einem weißen Papierschirm ein vollständiges Spektrum, und bedeckt nun die Spaltöffnung mit einer dunkelroten Glasscheibe, so bleiben von diesem Spektrum nur Rot und Orange übrig; die anderen Farben vom Gelb bis zum Violett sind ausgelöscht. Das rote Glas läßt also von sämtlichen im weißen Licht enthaltenen Farben nur das Rot und Orange durch, die anderen werden von ihm verschluckt oder absorbirt, für sie ist dieses Glas undurchsichtig. Es verhält sich gleichsam wie ein Sieb, welches die roten und orangefarbenen Strahlen durchläßt, die übrigen aber zurückhält, und eben darum erscheint es unserm Auge in einem aus dem Rot und Orange des Spektrums gemischten roten Farbenton. Ebenso verdankt ein grünes oder ein blaues Glas sein farbiges Aussehen dem Umstand, daß jenes die grünen, dieses die blauen Strahlen vorzugsweise durchläßt, die übrigen aber mehr oder weniger vollständig verschluckt. Eine gewöhnliche Fensterscheibe dagegen erscheint farblos, weil sie alle im weißen Licht enthaltenen farbigen Strahlen gleichgut durchläßt, so daß auch die durchgegangenen Strahlen in ihrem Verein wieder Weiß geben.

Läßt man das Spektrum, statt auf einen weißen Schirm, auf eine rote Papierfläche fallen, so bleibt, wie bei dem Versuch mit

dem roten Glas, nur noch das rote Ende des Spektrums sichtbar. Die auf die rauhe Papierfläche treffenden Lichtstrahlen dringen nämlich, ehe sie durch diffuse Zurückwerfung nach allen Seiten zerstreut werden, bis zu einer geringen Tiefe unter die Oberfläche und unterliegen hier der Absorption, welche der das Papier überziehende Farbstoff ausübt; dieser aber gibt nur die roten Strahlen zurück und verschluckt alle übrigen. Daraus erklärt es sich von selbst, warum dieses Papier, von weiſsem Tageslicht beleuchtet, rot erscheint. Fängt man das Spektrum ebenso auf gelbem, grünem, blauem Papier auf, so bemerkt man, daſs jedes derselben andere Teile des Spektrums verdunkelt oder auslöscht und vorzugsweise diejenige Farbe unversehrt läſst, welche das Papier im Tageslicht zeigt. Weiſses Papier absorbirt keine der im weiſsen Licht enthaltenen einfachen Farben mit besonderer Vorliebe, sondern wirft alle in ihrem ursprünglichen Mischungsverhältnis zurück, und gerade darum erscheint es bei Tagesbeleuchtung weiſs. Grau nennen wir eine Oberfläche, welche für alle farbigen Lichtarten ein gleichmäſsig geringes Zerstreuungsvermögen besitzt; schwarz endlich erscheint uns ein Körper, welcher, wie z. B. der Kienruſs, alle Strahlengattungen absorbirt. So erklärt sich die ganze reiche Mannigfaltigkeit der Körperfarben (natürlichen Farben) aus der von den Körpern ausgeübten Lichtabsorption; die Farbe eines Körpers ist nichts anderes als die Mischfarbe aus allen denjenigen farbigen Strahlen, welche von dem ihn beleuchtenden weiſsen Licht nach Abzug der absorbirten Strahlenarten noch übrig geblieben sind. Hiernach versteht es sich von selbst, daſs ein Körper im durchgelassenen und im diffus zurückgestrahlten Licht nur solche Farben zeigen kann, welche in dem einfallenden Licht schon enthalten sind. Damit ein rotes Papier rot erscheine, müssen rote Strahlen in dem Licht enthalten sein, mit dem es beleuchtet wird. Kerzenlicht z. B. enthält diese Strahlen; beleuchtet man es aber mit einer Weingeistlampe, deren Docht mit Kochsalz eingerieben ist oder mit einer Bunsenflamme, in welche man eine an einen Platindraht angeschmolzene Kochsalzperle gebracht hat (Natriumflamme), welche nur einfaches gelbes Licht ausstrahlt, so erscheint es schwarz. Bei dieser einfach gelben Beleuchtung lassen sich überhaupt keine Farbenunterschiede mehr wahrnehmen; man unterscheidet nur noch Hell und Dunkel. Die Gesichter der Menschen erscheinen geisterhaft bleich, und das farbenreichste Gemälde gleicht einer Sepiazeichnung. Wäre die Sonne ein Ball von glühendem Natriumdampf, so würde die ganze Natur dieses eintönig düstere Gewand tragen; es bedarf des weiſsen Sonnenlichts, in welchem unzählige Farben vereint sind, um den Farbenreichtum der Körperwelt unserm Auge zu erschlieſsen. Das Licht der Gasflammen und Kerzen enthält zwar alle Farben des Sonnenspektrums, jedoch in einer etwas andern Mischung; die gelben Strahlen sind darin sehr reichlich, die blauen und violetten verhältnismäſsig weit sparsamer vertreten als im Tageslicht, und es erscheint daher im Vergleich mit diesem gelb. Daraus erklärt sich

die bekannte Thatsache, dafs bei Kerzenlicht Weifs und Gelb leicht verwechselt werden, sowie grüne und blaue Kleiderstoffe nur schwer voneinander zu unterscheiden sind. Die grünen Stoffe nämlich werfen vorzugsweise Grün und etwas Blau, die blauen Stoffe nebst Grün vorzugsweise Blau zurück; da nun Blau im Kerzenlicht nur spärlich, Grün aber reichlich vorhanden ist, so müssen beide Stoffe mehr oder weniger grün aussehen.

Nicht immer ist das Spektrum des durch einen farbigen Körper durchgegangenen oder des von ihm zerstreuten Lichts (das Absorptionsspektrum) von so einfacher Art wie bei rotem Glas oder rotem Papier; es gibt viele farbige Stoffe, welche sich unter den Strahlengattungen des Spektrums eine oder mehrere Partien gleichsam auswählen, um sie zu verschlucken, während sie andere benachbarte oder dazwischenliegende Partien unangetastet lassen (auswählende Absorption); es offenbart sich dies im Spektrum durch mehr oder minder zahlreiche bald breitere bald schmalere dunkle Absorptionsstreifen auf dem hellen Grunde des Spektrums. So gewahrt man z. B. im Spektrum des durch ein grünes Pflanzenblatt durchscheinenden Lichts einen schwarzen Streifen im Hochrot (zwischen den Fraunhoferschen Linien *B* und *C*); dieses mittlere Rot wird nämlich von dem Blattgrün (Chlorophyll) verschluckt, nicht aber das äufserste Rot und das Orangerot. Der Farbstoff des Bluts absorbirt das violette Ende des Spektrums und erzeugt im Gelbgrün (zwischen *D* und *E*) zwei dunkle Absorptionsstreifen, die durch einen hellen gelbgrünen Zwischenraum voneinander getrennt sind. Manche gasförmige Körper, z. B. Untersalpetersäure, Joddampf u. a., zeigen in dem durch sie gegangenen Licht zahlreiche schmale dunkle Absorptionsstreifen.

Auch die Absorptionsstreifen, welche farbige Körper im Spektrum des durch sie gegangenen Tages- oder Lampenlichts hervorbringen, sind für die chemische Beschaffenheit dieser Körper kennzeichnend und gestatten, dieselben mit Hilfe des Spektroskops zu prüfen. Das Spektroskop kann daher in vielen Fällen dazu dienen, die Echtheit oder Verfälschung von Nahrungsmitteln, Arzneistoffen, Farbwaren etc. zu erkennen. Auch in die gerichtliche Medizin hat die Spektralanalyse Eingang gefunden, weil sie die geringsten Spuren von Blut durch die demselben eigentümlichen Absorptionsstreifen nachzuweisen vermag.

Die obenerwähnte Natriumflamme sendet einfaches gelbes Licht aus, welches durch das Prisma nicht zerlegt, sondern nur abgelenkt wird und eine helle gelbe Linie erzeugt. Sendet man nun durch diese gelbe Flamme das Licht eines weifsglühenden Körpers (z. B. Drummondsches oder elektrisches Licht) und breitet das durchgegangene Licht zu einem Spektrum aus, so erscheint an der Stelle der gelben Linie eine dunkle Linie auf dem hellen Grunde des sonst ununterbrochenen Spektrums, man sieht das umgekehrte Spektrum des Natriums; der in der Flamme enthaltene Natriumdampf hat also sämtliche von dem glühenden Körper ausgestrahlten Lichtgattungen

ohne Anstand durch sich hindurchgelassen, mit Ausnahme derjenigen gelben Strahlenart, welche er selbst auszusenden vermag; diese wird von ihm absorbirt, für sie allein ist er undurchsichtig. Das Gesetz, welches sich in dieser Thatsache offenbart, gilt ganz allgemein: Ein Körper absorbirt gerade diejenigen Strahlengattungen, die er selbst auszusenden im stande ist, oder das Absorptionsvermögen für eine bestimmte Strahlenart steht mit dem Ausstrahlungsvermögen für dieselbe bei gleicher Temperatur für alle Körper in demselben Verhältnis (Kirchhoffs Gesetz, 1860).

Schon Fraunhofer hatte beobachtet, daſs die helle gelbe Doppellinie [1]) des Natriumlichts dieselbe Stelle im Spektrum einnimmt wie die dunkle Doppellinie $D$ des Sonnenlichts. Nun sagt uns das Kirchhoffsche Gesetz, daſs ein gas- oder dampfförmiger Körper gerade diejenigen Strahlengattungen absorbirt, welche er im leuchtenden Zustande selbst aussendet, während er alle anderen Strahlenarten ungeschwächt durchläſst. Denken wir uns die Sonne als einen glühenden Körper, dessen Oberfläche weiſses Licht ausstrahlt, welches an und für sich ein ununterbrochenes Spektrum geben würde, und diesen Körper rings von einer aus weniger heiſsen Gasen und Dämpfen bestehenden Hülle umgeben, welche Natriumdampf enthält, so muſs dieser im Spektrum des Sonnenlichts eine dunkle Doppellinie an der Stelle der beiden Natriumlinien erzeugen; aus dem Vorhandensein des Linienpaares $D$ im Sonnenspektrum läſst sich demnach auf die Gegenwart von Natriumdampf in der Sonnenatmosphäre schlieſsen. Bei genauer Vergleichung der Fraunhoferschen dunkeln Linien mit den hellen Linien irdischer Stoffe stellte sich heraus, daſs eine sehr groſse Anzahl jener mit diesen genau übereinstimmen; so hat z. B. Rowland für 2000 der hellen Linien des Eisens ihr dunkles Ebenbild im Sonnenspektrum nachgewiesen, woraus wir schlieſsen, daſs auch Eisendämpfe in der Dampfhülle der Sonne enthalten sind. Die meisten Fraunhoferschen Linien sind hiernach nichts anderes als feine Absorptionsstreifen, hervorgebracht durch die Absorption, welche die in der Atmosphäre der Sonne [2]) enthaltenen Gase und Dämpfe auf das von dem weiſsglühenden Sonnenkörper ausstrahlende Licht ausüben; sie sind die Umkehrungen der hellen Linien, welche diesen Gasen und Dämpfen eigen sind. Wenn diese Anschauung richtig ist, so müſste diese Dampfhülle am Rande der Sonne, wo sie über deren weiſsglühenden Körper hinausragt, an Stelle der

---

[1]) Die Natriumlinie besteht ebenso wie die $D$-Linie des Sonnenspektrums aus zwei sehr nahe bei einander stehenden Linien $D_1$ und $D_2$, welche nur bei hinreichend starker Dispersion getrennt gesehen werden.

[2]) Einige Linien des Sonnenspektrums entstehen durch die Absorption der Erdatmosphäre, was man daran erkennt, daſs sie stärker werden, wenn die Sonne sich dem Horizont nähert und sonach ihre Strahlen einen längeren Weg in unserer Atmosphäre zu durchlaufen haben. Man nennt sie deshalb „atmosphärische“ Linien; zu ihnen gehören $A$ und $B$.

dunkeln Fraunhoferschen Linien helle Linien auf dunklem Grunde zeigen. Schon früher hatte man bei Sonnenfinsternissen am Sonnenrand rötlich gefärbte Hervorragungen oder Protuberanzen bemerkt, welche bald wie im Abendrot glühende Schneegebirge, bald wie schwebende Wolkenmassen aussehen. Die Untersuchung mit dem Spektroskop (welche sich auch bei unverfinsterter Sonne durchführen läſst) zeigte nun in der That, daſs das Spektrum des von diesen Gebilden ausgestrahlten Lichts aus hellen Linien besteht, unter welchen die drei Linien des Wasserstoffgases (*C*, *F* und eine etwas hinter *G*) die hervorragendsten sind. Die Protuberanzen sind demnach in der Hauptsache Ausbrüche glühenden Wasserstoffgases, auf dessen Gegenwart in der Sonnenatmosphäre aus der Übereinstimmung seiner hellen Linien mit den Fraunhoferschen Linien *C*, *F* und nahe *G* bereits geschlossen worden war. So gibt die Spektralanalyse nicht nur Aufschluſs über die chemische Zusammensetzung der Sonne, sondern auch der übrigen Himmelskörper, auf welche sie mit groſsem Erfolg ebenfalls Anwendung gefunden hat.

346. **Fluorescenz. Ultraviolette Strahlen.** Läſst man die Sonne auf Petroleum scheinen, so strahlt dieses an sich schwach gelbliche Öl nach allen Seiten violettblaues Licht aus, indem es während der Dauer der Beleuchtung selbstleuchtend wird; Wasser, in welches man einige Stückchen Roſskastanienrinde geworfen hat, schimmert vermöge des sich auflösenden Äsculins im Tages- oder Sonnenlicht hellblau, ebenso eine Chininlösung. Das gelbe Uranglas (Annaglas, Kanarienglas) zeigt bei Tagesbeleuchtung einen hellgrünen, gewisse Spielarten von Fluſsspat (Fluorcalcium) einen blauen Schimmer; nach letzterem Körper hat man die Erscheinung Fluorescenz genannt. Übergieſst man zerkleinerte Pflanzenblätter mit Weingeist, worin das Blattgrün (Chlorophyll) sich auflöst, so leuchtet die grüne Lösung, von den Sonnenstrahlen getroffen, mit blutrotem Licht; eine blaue Lösung von Resorcinblau fluorescirt hochrot, von Lackmus orange, ebenso die purpurrote Lösung von Naphthalinrot. Läſst man das Sonnenlicht durch eine Flasche mit Petroleum gehen, so vermag es, obgleich viel heller als das gewöhnliche Tageslicht, den blauen Schimmer in einer zweiten Flasche mit Petroleum nicht mehr hervorzurufen; es müssen demnach diejenigen besonderen Strahlenarten, welche dieses Vermögen besitzen, in dem Petroleum der ersten Flasche zurückbehalten (absorbirt) und zur Erregung des blauen Lichts verbraucht worden sein. Nur solche Strahlen können die Fluorescenz eines Stoffs hervorrufen, welche von ihm absorbirt werden, und thun dies um so stärker, je kräftiger sie absorbirt werden. Um genauer zu ermitteln, welche Strahlengattungen es sind, die dieses Selbstleuchten des Petroleums verursachen, lassen wir ein mittels Spalt, Prisma und Linse entworfenes Sonnenspektrum auf die in einem Glastrog enthaltene Flüssigkeit fallen, und beobachten, in welchen Teilen des Spektrums der blaue Schimmer auftritt. Das Rot und alle folgenden Farben bis zum Violett gehen wirkungslos hindurch;

erst im Violett beginnt der bläuliche Schimmer und bedeckt nicht nur den violetten Teil des Spektrums, sondern erstreckt sich noch weit über das violette Ende hinaus bis auf eine Entfernung, welche der Länge des unter gewöhnlichen Umständen sichtbaren Spektrums etwa gleichkommt. Hieraus geht hervor, dafs es Strahlen gibt, welche noch stärker brechbar sind als die violetten, die aber für gewöhnlich nicht gesehen werden. Man nennt sie überviolette (ultraviolette) Strahlen. Auf dem Petroleum werden sie sichtbar, weil sie seinen blauen Fluorescenzschimmer zu erregen im stande sind. Auf dem hellen bläulichen Grunde des „fluorescirenden" Spektrums zeigen sich nicht nur von *G* bis *H* die bekannten Fraunhoferschen Linien, sondern auch das ultraviolette Gebiet erscheint mit zahlreichen solchen Linien erfüllt, deren hervorragendste mit den Buchstaben *L* bis *S* bezeichnet worden sind (Fig. 365). Der Bergkrystall oder Quarz besitzt die Eigenschaft, die ultravioletten Strahlen weit vollkommener durchzulassen als Glas. Entwirft man daher das Spektrum mit einem Prisma und Linsen von Bergkrystall, so erscheint auf dem Petroleum der ultraviolette Teil des Spektrums beträchtlich

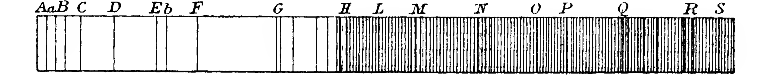



Fig. 365.
Sonnenspektrum mit dem ultravioletten Teil.

heller und noch weiter verlängert. Die ultravioletten Strahlen können übrigens auch unmittelbar ohne Vermittelung eines fluorescirenden Körpers durch ein Glas- oder Quarzprisma gesehen werden; man sieht sie in bläulichgrauer (lavendelgrauer) Farbe, wenn man das gewöhnlich allein sichtbare helle Spektrum abblendet; unser Auge ist also keineswegs unempfindlich für diese Strahlen höchster Brechbarkeit, sondern nimmt sie unter gewöhnlichen Umständen blofs deswegen nicht wahr, weil sie im Vergleich zu jenen hellen Strahlen zu lichtschwach sind.

Jeder fluorescirende Körper wird von derjenigen Strahlengattung am stärksten zum Selbstleuchten angeregt, welche er am kräftigsten absorbirt. Farblose oder schwach gelblich aussehende Substanzen, wie Chininlösung, Auszug der Rofskastanienrinde (Äsculin), Petroleum etc., welche nur die lichtschwachen violetten und ultravioletten Strahlen absorbiren und eben diesem Umstand ihr nahezu farbloses Aussehen verdanken, können natürlich nur unter dem Einflufs dieser Strahlen höchster Brechbarkeit fluoresciren. Die korallenrote Lösung des Eosins dagegen, welche erbsengrün fluorescirt, wird durch die grünen, Naphthalinrot durch die gelbgrünen, Blattgrün durch die hochroten Strahlen am stärksten erregt, in jedem Falle nämlich durch die Strahlengattung, durch deren Absorption die gesättigte Färbung dieser Körper verursacht wird, und welche sich im Spektrum des durch-

gelassenen Lichts (Absorptionsspektrum) durch einen schwarzen Absorptionsstreifen an der entsprechenden Stelle kenntlich macht.

Untersucht man das von einem fluorescirenden Körper ausgestrahlte Licht mittels des Prismas (etwa durch das Spektroskop), so findet man es zusammengesetzt, auch wenn das erregende Licht einfach ist. Das Fluorescenzlicht des Petroleums z. B., welches man etwa durch einfach violettes Licht vom Ende des Spektrums hervorruft, wird durch das Prisma zu einem Spektrum ausgebreitet, welches Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau und Violett enthält, jedoch in einem solchen gegenseitigen Verhältnis, dafs die aus allen diesen Farben gemischte Fluorescenzfarbe blau erscheint. Bei allen farblosen oder unscheinbar gefärbten fluorescirenden Körpern, welche, wie Petroleum, Chininlösung etc., nur die brechbareren Strahlen des Tageslichts absorbiren, enthält das ausgestrahlte Fluorescenzlicht nur solche Strahlen, welche weniger brechbar sind, als das erregende einfache Licht (Stokessche Regel). Bei jenen fluorescirenden Substanzen dagegen, welche sich durch starke Absorptionsstreifen im Gebiet der minder brechbaren Strahlen auszeichnen und daher lebhaft gefärbt erscheinen, können im Fluorescenzlicht auch Strahlen enthalten sein, welche brechbarer sind als das erregende Licht. Erregt man z. B. das Naphthalinrot durch Licht, welches durch rotes Glas gegangen ist und nur rote und orangefarbene Strahlen enthält, so findet man, dafs das erregte Fluorescenzlicht aus Rot, Orange, Gelb und Gelbgrün zusammengesetzt ist, dafs also durch orangefarbenes Licht die stärker brechbaren gelbgrünen Strahlen hervorgerufen worden sind (Lommel, 1871).

347. **Phosphorescenz. Ultrarote Strahlen.** Phosphorescenz nennt man im allgemeinen jedes schwache Leuchten eines Körpers, durch welche Ursache es auch hervorgerufen sein mag. Das Leuchten des Phosphors ist die Folge einer langsamen Verbrennung desselben; auch das Leuchten faulen Holzes, faulender Fische, der Johanniswürmchen erklärt sich durch chemische Vorgänge. Aber auch infolge mechanischer Einwirkungen sieht man oft Lichtentwickelung auftreten, z. B. beim Zusammenschlagen zweier Kieselsteine, beim Zerbrechen von Kreide, beim Zerstofsen von Zucker, beim Spalten von Glimmer. Der Chlorophan, eine gewisse Sorte Flufsspat, wird durch Erwärmen leuchtend, ebenso manche Diamanten.

Besonders merkwürdig ist das Leuchten mancher Körper nach vorhergegangener Beleuchtung. Am schönsten phosphoresciren auf diese Weise die sogen. Leuchtsteine, Schwefelverbindungen der alkalischen Erdmetalle (Calcium, Strontium, Barium), welche durch Glühen der entsprechenden Erden Kalk, Strontian oder Baryt mit Schwefel dargestellt werden. Läfst man die weifslichen Pulver, die man auf diese Weise erhält, nur wenige Augenblicke vom Sonnen- oder Tageslicht bescheinen, so leuchten sie nun stunden-, ja tagelang mit sanftem farbigem Lichte, dessen Farbe von dem Darstellungsverfahren und geringen fremden Beimengungen abhängt.

Um die Wirkung der verschiedenen Strahlengattungen auf diese Substanzen zu untersuchen, entwerfen wir ein Sonnenspektrum auf einem Schirm, dessen Oberfläche mit einem dieser phosphorescirenden Pulver (z. B. mit der käuflichen Balmainschen Leuchtfarbe) überzogen und durch vorhergegangene Beleuchtung mit Tageslicht zum Leuchten gebracht worden ist; nachdem die Strahlen des Spektrums einige Minuten lang eingewirkt haben und dann abgeblendet worden sind, sehen wir im Dunkeln auf dem Schirm ein eigentümliches „phosphorographisches“ Bild des Spektrums, welches da, wo die blauen und violetten Strahlen hintrafen, mit hellerem Phosphorescenzlichte strahlt als der schwach leuchtende Grund des Schirmes, dort aber, wo Grün, Gelb, Rot gewirkt haben, dunkel auf hellem Grunde erscheint. Man sieht also, dafs nur die brechbareren Strahlen (etwa von der Fraunhoferschen Linie *F* an) die Phosphorescenz zu erregen im stande sind, die weniger brechbaren dagegen das bereits vorhandene Phosphorescenzlicht auslöschen. Diese auslöschende Wirkung erstreckt sich aber noch weit über das rote Ende des Spektrums (Linie *A*) hinaus; daraus folgt, dafs es noch unsichtbare Strahlen gibt, welche weniger brechbar sind als die roten, und die man daher ultrarote (infrarote) Strahlen nennt. Das vollständige Sonnenspektrum besteht demnach aus folgenden drei Teilen: dem unsichtbaren ultraroten Teil, dem zwischen den Fraunhoferschen Linien *A* und *H* gelegenen sichtbaren Teil und dem unsichtbaren ultravioletten Teil.

Der Auslöschung des Phosphorescenzlichts durch die genannten Strahlen geht stets ein stärkeres Aufleuchten der Substanz vorher; diese Strahlen bewirken, dafs der Energievorrat, den der phosphorescirende Körper durch Absorption der ihn erregenden brechbareren Strahlen in sich aufgenommen, in kürzerer Zeit und darum gleichsam koncentrirter wieder herausgegeben wird. Läfst man daher auf einen phosphorescirenden Schirm ein Spektrum fallen, so erblickt man aufserhalb seines roten Endes das Gebiet der ultraroten Strahlen in hellem Grünlichblau, weil hier das Phosphorescenzlicht zu höherer Leuchtkraft angefacht wird (Becquerel, 1866. Lommel, 1883).

E. Wiedemann bezeichnet alle Leuchtprozesse ohne entsprechende Erhitzung als Luminescenz, und zwar die durch absorbirtes Licht hervorgerufene Fluorescenz und Phosphorescenz als Photoluminescenz, das Leuchten durch Einwirkung von Kathodenstrahlen (268) als Kathodoluminescenz, das durch chemische Vorgänge bedingte Leuchten als Chemiluminescenz.

348. **Wärmewirkung der Strahlen.** Die ultraroten Strahlen wurden übrigens schon 1800 von Herschel entdeckt, als er ein berufstes Thermometer durch das Spektrum führte und beobachtete, dafs die Wärmewirkung vom violetten nach dem roten Ende hin zunimmt und erst in dem dunkeln Gebiet jenseits des roten Endes ihren gröfsten Wert erreicht. Als eines feineren Mittels zum Nachweis und zur Erforschung dieser dunkeln Wärmestrahlen bediente sich Melloni (1834) einer Thermosäule in Verbindung mit einem Galvanometer,

des Thermomultiplikators, Fig. 366 (vgl. 237). Derselbe besteht aus einer thermoelektrischen Säule *p*, deren berufste Endflächen zum Auffangen der Strahlen einerseits mit einer cylindrischen (*a*), andererseits mit einer kegelförmigen Ansatzröhre (*b*) versehen sind, und einem sehr empfindlichen Galvanometer (Multiplikator) *M*, mit welchem die Thermosäule durch die Klemmschrauben *x*, *y* und die Leitungsdrähte *g*, *h* in Verbindung steht. Die von der Lampe *L* ausgestrahlte Wärme gelangt durch das Loch des Metallschirms *s* zur einen Endfläche der Thermosäule und erregt einen thermoelektrischen Strom, der eine um so gröfsere Ablenkung der Magnetnadel des Galvanometers hervorbringt, je kräftiger die Strahlung ist. Thermosäule,

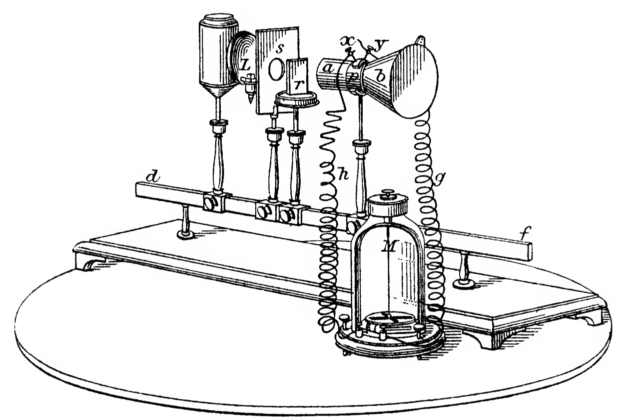



Fig. 366.
Thermomultiplikator.

Lampe, Schirm und ein zum Tragen der zu untersuchenden Gegenstände (*r*) bestimmtes Tischchen sind längs einer Messingschiene verstellbar. Mittels des Thermomultiplikators kann man die Wärmewirkung der verschiedenen Gegenden des Spektrums durch genaue Messung bestimmen (349). In neuerer Zeit bedient man sich hierzu auch des Bolometers (230).

Die dunkeln Wärmestrahlen befolgen die nämlichen Gesetze der Zurückwerfung und Brechung wie die sichtbaren Lichtstrahlen. Stellt man z. B. zwei grofse Hohlspiegel in der durch Fig. 367 angedeuteten Weise einander gegenüber und bringt in den Brennpunkt des einen eine erhitzte eiserne Kugel, so werden die von ihr ausgehenden Strahlen unter sich parallel auf den anderen Spiegel zurückgeworfen und von diesem in seinem Brennpunkt gesammelt; ein dahin gebrachtes Thermometer, dessen Kugel durch Überziehen mit Rufs zur Aufnahme der Wärmestrahlen fähig gemacht worden, steigt, und eine daselbst aufgestellte schwach phosphorescirende Platte leuchtet hell auf (347). Eine Sammellinse entwirft von der heifsen Kugel jenseits ein unsichtbares Wärmebild, welches auf der phos-

phorescirenden Platte ebenfalls sichtbar wird. Durch ein Prisma werden die Strahlen, die von der heifsen Kugel ausgehen, gebrochen, wie die Lichtstrahlen, aber sie werden weniger stark als die roten Strahlen abgelenkt. Sie sind demnach von derselben Natur wie die ultraroten Strahlen der Sonne.

Die Durchlässigkeit verschiedener Körper ist, wie für helle Strahlen, so auch für dunkle Wärmestrahlen sehr verschieden. Reine Luft läfst die Sonnenstrahlen, dunkle wie helle, fast vollständig durch sich hindurchgehen; sie wird daher von ihnen nur unbedeutend erwärmt; die höheren Luftschichten, obgleich sie die Sonnenstrahlen aus erster Hand empfangen, bleiben dennoch so kalt, dafs selbst in der heifsen Zone die Gipfel der Hochgebirge mit ewigem Schnee bedeckt sind. Die Erwärmung der Atmosphäre erfolgt zum weitaus gröfseren Teil nicht unmittelbar durch die Sonnenstrahlen, sondern mittelbar durch die erhitzte Erdoberfläche, welche ihre durch Einsaugung der Strahlen erworbene Wärme zunächst den sie berührenden unteren Luftschichten mitteilt; indem diese, leichter geworden, emporsteigen, führen sie die Wärme auch den höheren Luftschichten zu. Weder das Wasser, noch die Wolken, noch irgend welche Bestandteile der festen Erdrinde sind so durchlässig wie die Luft; alle absorbiren einen gröfseren oder geringeren Anteil der sie treffenden Sonnenstrahlen und erwärmen sich dadurch. Melloni nannte Körper, welche die dunkeln (ultraroten) Wärmestrahlen in ähnlicher Weise durchlassen wie durchsichtige Körper die leuchtenden Strahlen, diatherman; atherman dagegen solche, welche die dunkeln Wärmestrahlen absorbiren. Steinsalz läfst fast alle dunkeln Wärmestrahlen (ebensogut wie die hellen) durch[1]) und verhält sich demnach zu ihnen wie ein farblos durchsichtiger Körper gegenüber den Lichtstrahlen; der für Licht ebenso durchsichtige Alaun dagegen ist für ultrarote Strahlen nahezu undurchlässig. Andere Körper absorbiren bestimmte Partien aus dem ultraroten Gebiet des Spektrums und verhalten sich also den dunkeln Wärmestrahlen gegenüber ähnlich wie gefärbte durchsichtige Körper, welche nur Lichtstrahlen von gewisser Farbe durchlassen, andersfarbige aber absorbiren. Melloni bezeichnete dieses Verhalten als Wärmefärbung oder Thermochrose.

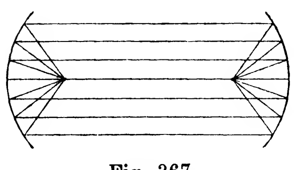


Fig. 367.
Zurückwerfung der Wärmestrahlen.

Aus allen diesen Thatsachen geht hervor, dafs zwischen den dunkeln Wärmestrahlen und den Lichtstrahlen an sich kein anderer Unterschied besteht als der stufenweise Unterschied der Brechbarkeit; jene unterscheiden sich von den roten Strahlen nicht mehr als die roten von den gelben oder die gelben von den grünen. Die Unsicht-

[1]) Um ein Spektrum mit vollständigem ultraroten Teil zu erhalten, wendet man daher Linsen und Prismen aus Steinsalz oder Flufsspat an.

barkeit jener wie die Sichtbarkeit dieser ist nicht in dem Wesen der Strahlen, sondern in der Beschaffenheit unseres Auges begründet, welches zur Wahrnehmung der ultraroten Strahlen nicht befähigt ist. Diese sind uns unmittelbar nur durch den Gefühlssinn als Wärme wahrnehmbar, die hellen Strahlen dagegen wirken gleichzeitig auf zwei Sinne, auf die Gefühlsnerven als Wärme, auf das Auge als Licht. Jeder Lichtstrahl ist zugleich auch eine Wärmestrahl. Wir sind durch kein Mittel im stande, die Wärmewirkung, welche z. B. dem einfachen gelben Lichte der Natriumflamme innewohnt, von seiner Lichtwirkung zu trennen; es gibt eben keine Strahlen von dieser Brechbarkeit, welche nur Wärmewirkung und keine Lichtwirkung hervorzubringen vermögen. Licht und strahlende Wärme sind daher als Wirkungen ein und derselben Ursache nicht an sich, sondern nur für uns, als Empfindungsformen, voneinander verschieden. Derselbe einheitliche Strahl ruft in uns je nach der Nervenbahn, durch welche der von ihm hervorgebrachte Eindruck zu dem Sitz unseres Bewufstseins geleitet wird, bald Licht-, bald Wärmeempfindung hervor, ähnlich wie eine angeschlagene Stimmgabel in unserem Ohre eine Tonempfindung, in der berührenden Hand aber das Gefühl des Schwirrens hervorruft.

349. **Abhängigkeit der Strahlung von der Temperatur. Energiespektrum.** Die alltägliche Erfahrung lehrt, dafs die Strahlung, die ein Körper aussendet, um so stärker ist, je höher seine Temperatur ist. Aber mit steigender Temperatur ändert sich nicht blofs die Stärke, sondern auch die Beschaffenheit der Strahlung. Ein mäfsig warmer Körper sendet nur dunkle Strahlen aus. Erwärmen wir ihn höher, so treten allmählich zu diesen dunklen immer höher brechbare Strahlen dazu; der heifse Körper wird sichtbar, er glüht. Bei $540^0$ zeigt sich das Rot bis gegen $B$ (dunkles Rotglühen), bei $700^0$ (Hellrotglühen) erstreckt sich das Spektrum der ausgesandten Strahlen bis jenseits $F$ und endlich beim Weifsglühen ($1200^0$) über $H$ hinaus.

Der nach Draper bei etwa $525^0$ beginnenden Rotglut geht die 1887 von F. Weber entdeckte Grauglut vorauf, die bei etwa $400^0$ beginnt. In diesem Stadium senden die Körper ein ganz schwaches Leuchten aus, das als ein farbloser Lichtschimmer zuerst an den für geringe Lichtstärken empfindlicheren seitlichen Teilen des Augenhintergrundes (im indirekten Sehen) wahrgenommen wird (Gespenstergrau).

Genauere Untersuchungen über diese Änderung der Strahlung mit der Temperatur sind in neuerer Zeit von Langley, später von Paschen, Lummer und Pringsheim angestellt worden. Um zu untersuchen, welche Strahlen ein Körper aussendet, wie sich die Energie der einzelnen Strahlenarten zu einander verhält und wie sie sich mit der Temperatur ändert, läfst man nicht die ganze Strahlung des Körpers, sondern nur schmale Bezirke der spektral zerlegten Strahlung auf die Thermosäule oder das Bolometer fallen. Diesem

Apparate gibt man hierfür die Gestalt einer geraden, möglichst feinen Linie, die man wie den vertikalen Faden eines Fadenkreuzes auf die einzelnen Strahlenarten des Spektrums einstellen kann. Die Wärmewirkung, welche ein solches lineares Bolometer anzeigt, ist dann ein Maſs für die Energie derjenigen Strahlenart, von der es getroffen wird. Miſst man in diesem Maſs die Strahlungsenergie für die einzelnen Strahlenarten, indem man den Apparat durch das ganze Spektrum hindurchwandern läſst, so findet man, daſs die Strahlungsenergie für eine gewisse Stelle am gröſsten ist und von

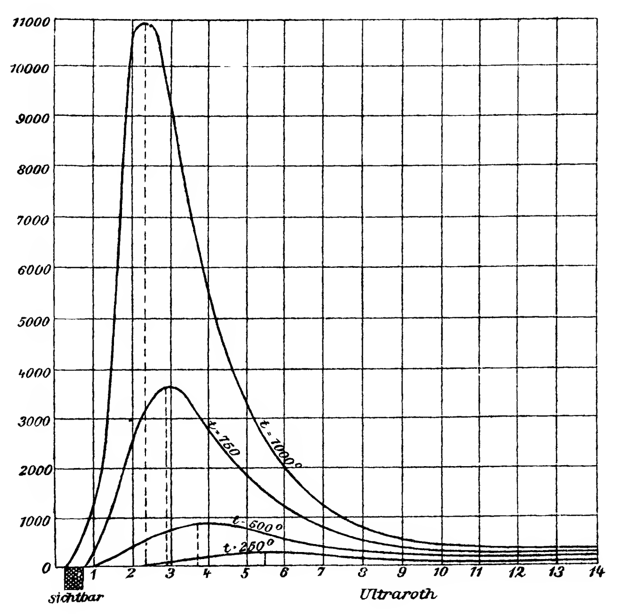



Fig. 368.
Verteilung der Energie im Spektrum.

hier aus nach der Seite der sichtbaren Strahlen schneller, nach der andern Seite hin langsamer abnimmt. Denkt man sich die verschiedenen Strahlenarten dargestellt durch die Punkte einer horizontalen Linie und errichtet man in jedem Punkte eine senkrechte gerade Linie, deren Länge man der dieser Strahlenart entsprechenden Wärmewirkung proportional nimmt, so bilden die oberen Enden dieser Linien eine Kurve derart, wie sie in Fig. 368 abgebildet sind. Eine solche Kurve stellt uns also anschaulich die Energieverteilung im Spektrum eines strahlenden Körpers vor. Fig. 368 zeigt uns in erster Linie, wie ausgedehnt das ultrarote Spektrum erscheint, wenn man hinreichend empfindliche Meſsinstrumente verwendet. Allerdings ist die in der Figur gewählte Anordnung der Strahlenarten nicht diejenige, welche ein Prisma ergeben würde.

Bei der prismatischen Zerlegung hängt die Verteilung der Strahlenarten auf die Ausdehnung des Spektrums nicht bloſs von den Strahlen, sondern auch von der Natur des Prismenstoffes ab. Unabhängig davon ist man, wenn man die spektrale Zerlegung durch ein Beugungsgitter bewirkt (Fig. 359). Hier ordnen sich die Strahlenarten ihrer Natur entsprechend, d. h., wie wir in den nächsten Abschnitten sehen werden, nach ihren Wellenlängen. Danach sind sie auch in Fig. 368 auf der horizontalen Linie aufgetragen (die beigeschriebenen Zahlen bedeuten Wellenlängen in Tausendstel Millimetern). Das sichtbare Spektrum ist dabei auf das kleine schraffirte Gebiet beschränkt. Links davon zwischen 0 und der Grenze des schraffirten Teiles liegt das ultraviolette Gebiet, rechts davon liegt die ultrarote Strahlung. Die vier verschiedenen Kurven dieser Figur zeigen uns, wie sich die Wärmewirkung der einzelnen Strahlenarten im Spektrum mit der Temperatur ändert. Die Kurven stellen sie dar für die Temperaturen 250$^0$, 500$^0$, 750$^0$ und 1000$^0$ Celsius. Man sieht, wie das Maximum der Energie mit wachsender Temperatur sich nach dem sichtbaren Spektrum hin verschiebt und zugleich die Wärmewirkung dieses Maximums mit der Temperatur sehr schnell ansteigt.

Durch schwierige theoretische Betrachtungen ist es in letzter Zeit gelungen, die Abhängigkeit der Strahlungsenergie von der Strahlenart (d. h. der Wellenlänge als dem Charakteristikum der Strahlenart) einerseits und von der Temperatur andererseits durch eine Formel darzustellen. Aus ihr hat sich eine einfache Gesetzmäſsigkeit für die Stärke und die Lage des Maximums der Energiekurve ergeben. Danach wächst die Strahlungsenergie des Maximums wie die fünfte Potenz der absoluten Temperatur. Für die Curve $t = 1000^0$ (in absoluter Temperatur 1273) und $t = 750$ ($T = 1023$) verhalten sich also die gestrichelt gezeichneten Ordinaten des Maximums wie $(1273/1023)^5$. Die Strahlenart aber, auf die das Maximum fällt, ändert sich mit der Temperatur so, daſs ihre Wellenlänge der absoluten Temperatur des strahlenden Körpers umgekehrt proportional ist (W. Wien's Verschiebungsgesetz). Auch für die gesamte, von einem Körper ausgestrahlte Energie, die man miſst, wenn man sie ohne spektrale Zerlegung auf eine Thermosäule oder ein Bolometer fallen läſst, hat sich aus theoretischen Betrachtungen eine einfache Abhängigkeit von der Temperatur ergeben. Die gesamte Strahlungsenergie ist nämlich der vierten Potenz der absoluten Temperatur proportional (Gesetz von Stefan und Boltzmann). Bei 546$^0$ C. ist also z. B. die gesamte Strahlung, die ein Körper aussendet, 81 mal gröſser, bei 273$^0$ C. 16 mal gröſser als bei 0$^0$ C. Diese Gesetzmäſsigkeiten sind durch experimentelle Untersuchungen bestätigt worden. Man kann nun umgekehrt von diesen Gesetzmäſsigkeiten interessante Anwendungen machen, um die Temperatur strahlender Körper (der Flamme, des Lichtbogens, der Sonne) zu ermitteln, indem man die Gröſse ihrer gesamten Ausstrahlung oder die Lage ihres Energiemaximums bestimmt. Für die Sonne kann man danach auf eine Temperatur ihrer strahlenden Oberfläche von etwa 6000$^0$ C. schlieſsen.

Die theoretischen Betrachtungen gelten allerdings nicht für beliebige strahlende Körper, sondern nur für solche, welche alle Strahlen gleich gut ausstrahlen. Da Emission und Absorption parallel gehen, gelten also jene Betrachtungen für Körper, die alle Strahlen auch gleich gut absorbieren. Einen Körper, der das thut, nennen wir einen vollkommen schwarzen Körper. Zur Prüfung der obigen Strahlungsgesetze hat man daher zunächst die Strahlung an möglichst schwarzen Körpern untersucht. Man kann aber der Bedingung des schwarzen Körpers besser als mit künstlich geschwärzten Flächen und in ganz vollkommener Weise genügen, wenn man die aus dem Innern eines strahlenden

Hohlkörpers austretende Strahlung benutzt. In der That erscheint ein Loch, durch das man in das geschwärzte Innere einer kupfernen Hohlkugel hineinblickt, vollkommen schwarz; es absorbirt, wenn es klein ist im Vergleich zur ganzen Kugel, alle Strahlen, die darauf fallen. In gleicher Weise entspricht dann auch die Strahlung, die aus diesem Loche austritt, wenn man die Kugel erwärmt, der Strahlung eines idealen schwarzen Körpers.

350. **Radiometer.** Zum Nachweis der Wärmewirkung von Strahlen kann auch das Radiometer (Strahlungsmesser, Lichtmühle) dienen, ein von Crookes erfundener Apparat, der durch Licht- und Wärmestrahlen in Bewegung gesetzt wird. Es besteht aus einem vierarmigen, mittels eines Glashütchens auf einer Nadelspitze drehbaren Rädchen (Fig. 369) aus Aluminiumdraht; jeder Arm trägt ein vertikales Blättchen aus geglühtem Glimmer, dessen eine Seite geschwärzt ist und zwar so, daſs die schwarzen Flächen alle nach derselben Drehrichtung gekehrt sind. Das Ganze ist in eine Glaskugel von 5—6 cm Durchmesser eingeschlossen, in welcher die Luft in hohem Grade verdünnt ist. Läſst man auf das Radiometer Licht- oder Wärmestrahlen treffen, so dreht sich das Rädchen, in dem die nicht geschwärzten Flächen vorangehen, als ob die schwarzen Flächen durch die Strahlen eine Abstoſsung erlitten, und zwar um so rascher, je kräftiger die Wärmewirkung der Strahlung ist. Man kann sich den Vorgang im Sinne der kinetischen Gastheorie (129) etwa dadurch erklären, daſs die in rascher Bewegung befindlichen Luftmoleküle an den durch Absorption höher erwärmten geschwärzten Flächen schneller und häufiger zurückprallen, als an den nicht geschwärzten Flächen und jenen daher einen kräftigeren Rückstoſs erteilen.

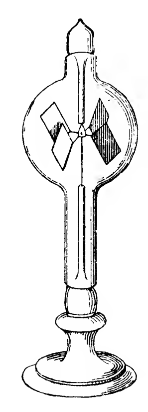


Fig. 369. Radiometer.

Wenn man ein Radiometer vom violetten Ende nach dem roten Ende eines Spektrums verschiebt, so beobachtet man, daſs es sich mit steigender Geschwindigkeit dreht und fortfährt sich zu drehen, wenn man es über das rote Ende hinaus in das ultrarote Gebiet gebracht hat.

351. **Chemische Wirkung des Lichts. Photographie.** Es ist eine alte Erfahrung, daſs es Körper gibt, welche durch die Einwirkung des Lichts eine bleibende Umwandlung ihrer Eigenschaften, eine Änderung ihrer chemischen Zusammensetzung erfahren. Das Bleichen der Leinwand und des Wachses, das sog. „Verschieſsen“ gefärbter Zeuge, das Verblassen von Aquarellmalereien, das Braunwerden des Tannenholzes etc. sind bekannte Beispiele für die chemische Wirkung des Lichts. Legt man auf ein Blatt Papier, das Chlorsilber enthält, einen flachen Gegenstand, z. B. ein Pflanzenblatt, und läſst das Tageslicht darauf scheinen, so wird das Chlorsilber an den freigebliebenen Stellen des Papiers durch das Licht geschwärzt, und man erhält auf dunklem Grund ein helles Bild des Pflanzen-

blatts. Noch empfindlicher gegen die Einwirkung des Lichts als Chlorsilber ist Brom- und Jodsilber. Auf der chemischen Wirkung des Lichts auf diese Silbersalze beruht die Photographie. Das Verfahren des Photographen besteht nämlich darin, dafs er das durch eine Camera obscura entworfene Bild einer Person oder eines Gegenstandes auf einer Glasplatte auffängt, welche mit einer Bromsilber enthaltenden Kollodium-, Eiweifs- oder Gelatineschicht überzogen ist. Auf der herausgenommenen Platte sieht man zunächst noch kein Bild, denn das Licht hat während der kurzen Dauer seiner Einwirkung die Zersetzung des Silbersalzes erst eingeleitet; um das Bild hervorzurufen oder zu entwickeln, wird die Platte mit der Lösung einer reducirenden Substanz (Eisenvitriol, Hydrochinon) übergossen, welche die begonnene Zersetzung vollendet. An den hellsten Stellen des Bildes wird hierdurch das Bromsilber völlig geschwärzt, an den halb dunkeln Stellen tritt, je nach den Abstufungen der Schatten, teilweise Schwärzung ein, an den ganz dunkeln Stellen aber bleibt das Bromsilber unverändert. Man hat nun auf der Glasplatte ein sogen. negatives Bild, welches die hellen Stellen des Gegenstandes dunkel, die dunkeln hell zeigt. Dieses Bild würde aber nur von kurzer Dauer sein, weil das unverändert gebliebene Silbersalz durch das Tageslicht bald ebenfalls zersetzt und sonach die ganze Platte geschwärzt werden würde. Das Bild wird daher fixirt, indem man es mit einer Lösung von unterschwefligsaurem Natrium oder Cyankalium abspült, die das unzersetzte Silbersalz auflöst. Ein positives Bild mit Licht und Schatten an den richtigen Stellen erhält man, wenn man die negative Platte auf Chlorsilberpapier legt und dem Sonnenlicht aussetzt, das hinter jeder hellen Stelle der Platte eine dunkle Stelle auf dem Papier erzeugt. Das positive Bild wird sodann durch Auswaschen des Papiers mit einer Lösung von unterschwefligsaurem Natrium, welche das unzersetzt gebliebene Chlorsilber auflöst, fixirt. Das Entwickeln und Fixiren wird bei gelber oder roter Beleuchtung vorgenommen, da die Silbersalze für gelbes und rotes Licht unempfindlich sind.

Schon aus der alltäglichen Erfahrung ergibt sich nämlich, dafs die blauen Strahlen photographisch wirksamer sind als gelbe und rote; denn ein blaues Kleid z. B. sieht in der Photographie sehr hell aus, ein rotes dagegen sehr dunkel, obgleich, unmittelbar betrachtet, gerade ersteres dem Auge als das dunklere erscheint. Chlorsilberpapier, zum Teil mit rotem, zum Teil mit blauem Glas bedeckt, wird im Licht nur unter letzterem geschwärzt. Den unmittelbarsten Aufschlufs über die Wirkung der verschiedenfarbigen Strahlen erhält man aber, indem man das Sonnenspektrum selbst photographirt. Bei einer gewöhnlichen photographischen Platte bleiben die roten, gelben und ein Teil der grünen Strahlen völlig unwirksam, dagegen bildet sich das blaue und violette Gebiet mit allen Fraunhoferschen Linien sehr schön ab; das photographirte Spektrum endigt aber nicht wie das unmittelbar gesehene mit der am Ende des Violett

liegenden Linie *H*, sondern erstreckt sich noch weit darüber hinaus, da auch die ultravioletten Strahlen photographisch wirksam sind. Wenn man der lichtempfindlichen Schicht Farbstoffe (Azalin, Eosin u. a.) zusetzt, welche die weniger brechbaren Strahlen absorbiren, so erhält man sogen. orthochromatische Platten, auf welche auch die grünen, gelben, roten Strahlen chemisch wirken. Mittels einer besonders präparirten Bromsilberemulsion ist es Abney (1880) sogar gelungen, das ultrarote Gebiet des Spektrums zu photographiren. Die Photographie der weniger brechbaren Teile des Spektrums bis weit ins Ultrarote hinein gelingt auf folgende Weise auch mit gewöhnlichen photographischen Platten: man erzeugt auf einer phosphorescirenden Fläche (Balmainsche Leuchtfarbe) das phosphorographische Bild des Spektrums (347), auf dessen dunklem Grunde die Fraunhoferschen Linien bläulich leuchtend stehen bleiben, und legt auf dieses Bild eine gewöhnliche Gelatinetrockenplatte, auf der sich nun das Spektrum mit allen seinen Einzelheiten deutlich abbildet (Lommel, 1890).

Man kann die brechbareren Strahlen, welche auf Chlor-, Brom- und Jodsilber wirken, nämlich die blauen, violetten und ultravioletten, passend als photographische Strahlen bezeichnen. Wenn man sie, wie häufig geschieht, „chemische Strahlen“ nennt, so schreibt man ihnen dadurch mit Unrecht die ausschliefsliche Fähigkeit zu, chemisch zu wirken. Ihre chemische Wirkung beruht nicht, wie man durch letztere Bezeichnung verleitet werden könnte zu glauben, auf einem besonderen, ihnen im Gegensatz zu anderen Strahlen allein innewohnenden chemischen oder, wie man auch gesagt hat, aktinischen Vermögen, sondern einfach auf dem Umstand, dafs jene leicht zersetzbaren Silbersalze die brechbareren Strahlen absorbiren, die weniger brechbaren aber ungehindert durchlassen. Eine Wirkung auf einen Körper, sei es eine chemische oder irgend eine andere, können aber nur solche Strahlen hervorbringen, welche von dem Körper absorbirt werden. Auf einen zersetzbaren Körper, welcher vorzugsweise die weniger brechbaren Strahlen absorbirt, werden daher gerade diese am stärksten chemisch wirken. Ein Beispiel für die chemische Wirkung der minder brechbaren Strahlen bietet uns die Natur selbst im grofsen dar. Die Pflanzen nämlich beziehen die gesamte Menge des Kohlenstoffs, welchen sie zum Aufbau ihres Körpers bedürfen, aus der Luft, indem sie die der Luft beigemischte gasförmige Kohlensäure zerlegen in Kohlenstoff, welcher in der Pflanze zurückbleibt, und Sauerstoff, welcher gasförmig in die Atmosphäre zurückkehrt. Diese Zerlegung der Kohlensäure unter Aneignung (Assimilation) des Kohlenstoffs vollzieht sich in den grünen Pflanzenteilen durch die Einwirkung des Sonnenlichts auf das Blattgrün (Chlorophyll), und zwar vorzugsweise durch die vom Chlorophyll absorbirten mittleren roten Strahlen (Lommel, 1871, Engelmann, 1881).

352. **Energie der Sonnenstrahlung.** Wenn die Sonnenstrahlen an der Erdoberfläche vollständig zurückgeworfen würden, so könnten

sie dieselbe weder erwärmen, noch in irgend einer Art auf sie wirken; ihre Wirkung wird erst ermöglicht durch die absorbirende Fähigkeit der irdischen Gegenstände. Die klare Luft läfst die Sonnenstrahlen fast ungeschwächt durch sich hindurchgehen und wird daher von ihnen unmittelbar nur wenig erwärmt; dagegen erfährt die feste Erdrinde, welche ein bedeutendes Absorptionsvermögen besitzt, eine beträchtliche Erwärmung; vom Boden aus wird nun allmählich auch die Luft erwärmt; indem diese Erwärmung an verschiedenen Stellen der Erdoberfläche ungleich ausfällt, z. B. am Äquator wegen des steileren Einfallens der Strahlen einen höheren Grad erreicht als in den Polargegenden, wird das Gleichgewicht der Atmosphäre gestört und sucht sich durch Strömungen, welche wir Winde nennen, wiederherzustellen. Die Bewegungen unserer Atmosphäre werden sonach ursprünglich durch die Sonnenstrahlen verursacht; in der Brise, welche die Schiffsegel schwellt, wie in dem Orkan, welcher Bäume entwurzelt, offenbart sich ein Teil der Energie, welche die Sonne durch ihre Strahlung dem Erdball zusandte. Durch die Verdampfung, welche unter dem Einflufs der Sonnenstrahlen an der Meeresoberfläche vor sich geht, werden ungeheure Mengen Wasserdampf in die höheren Luftschichten emporgehoben, von wo sie, zu Wasser verdichtet, als Regen oder Schnee herabfallen und, zu Bächen und Flüssen gesammelt, dem Meere wieder zuströmen. Während dieses Kreislaufs gibt das Wasser die gesamte Energie wieder aus, welche es am Anfang von der Sonne empfing. Der fallende Regentropfen, der schiffetragende Strom, das Gefälle, welches Mühlenräder dreht oder den Tunnelbohrer durch den Alpengranit treibt, verdanken ihre Energie der Sonne. — In den grünen Blättern der Pflanzen wird durch die von ihnen absorbirten Sonnenstrahlen die aus der Luft aufgenommene Kohlensäure zerlegt; der Sauerstoff derselben wird der Atmosphäre zurückgegeben, der Kohlenstoff aber wird zum Aufbau des Pflanzenkörpers verwendet. In dem Holz eines Baumstamms findet sich die Energie der Sonnenstrahlen, welche zu seiner Bildung im Laufe der Jahre verbraucht wurde, in unthätigem Zustand gleichsam aufgespeichert; sie kommt aber ungeschmälert als thätige Energie in Form von Licht und Wärme zum Vorschein, wenn das Holz oder vielmehr der in ihm enthaltene Kohlenstoff durch Verbrennung wieder in den Zustand der Kohlensäure zurückgeführt wird. In den Steinkohlenlagern, umgewandelten Resten urweltlicher Pflanzen, besitzen wir einen reichen Sparpfennig gebundener Sonnenenergie, welche, durch den Verbrennungsvorgang wieder in Freiheit gesetzt, unsere Wohnungen heizt und beleuchtet, in unseren Werkstätten Hämmer schwingt und Spindeln dreht und die Lokomotive auf dem Eisenstrang dahintreibt. — Von den Tieren nähren sich die einen unmittelbar von Pflanzen, andere verzehren ihre pflanzenfressenden Mitgeschöpfe: in beiden Fällen erscheint die Pflanzenwelt als die Ernährerin alles tierischen Lebens. Im tierischen Körper verbindet sich der in der Nahrung eingenommene Kohlenstoff mit

dem eingeatmeten Sauerstoff und wird in Form von Kohlensäure ausgehaucht: die Uhr, welche im Pflanzenkörper aufgezogen wurde, läuft im Tierkörper wieder ab, d. h. die Energie der Sonnenstrahlen, welche die Pflanze zur Trennung des Kohlenstoffs vom Sauerstoff verbrauchte, wird im tierischen Körper bei der Wiedervereinigung dieser beiden Bestandteile als Wärme und Bewegung wieder frei. Die Wärme unseres Blutes, der Pulsschlag unseres Herzens, die Arbeitsfähigkeit unserer Arme sind nichts anderes als Energie, welche ursprünglich der Sonne entstammt. So wird die Sonne durch Vermittelung der Strahlen, die sie uns aus weiter Ferne zusendet, zum Urquell aller Wärme, alles Lebens, aller Bewegung an unserer Erdoberfläche.

Um den Betrag der unserer Erdoberfläche zugestrahlten Sonnenenergie kennen zu lernen, mufs man die Wärmemenge ermitteln, welche die Sonnenstrahlen, wenn sie von einer Fläche von bestimmter Gröfse vollständig absorbirt werden, hervorzubringen vermögen. Pouillet hat sich zur Ausführung dieser Messung der von ihm Pyrheliometer genannten Vorrichtung (Fig. 370) bedient. Dieselbe besteht aus einem Thermometer, dessen Kugel sich inmitten eines cylindrischen Gefäfses aus dünnem Silberblech befindet, welches mit Wasser gefüllt ist. Die aus dem Gefäfs hervortretende Thermometerröhre ist von einem Messingrohr umhüllt, das seitlich behufs Ablesung des Thermometerstandes einen Schlitz trägt. Auf dem Messingsrohr ist noch eine Metallscheibe von gleichem Durchmesser wie das silberne Gefäfs aufgesetzt. Damit die Sonnenstrahlen den mit Kienrufs geschwärzten und dadurch zur Wärmeaufsaugung vorzüglich geschickt gemachten Boden des Silbergefäfses senkrecht und somit in möglichst günstiger Richtung treffen, braucht man das Instrument nur so gegen die Sonne zu stellen, dafs der Schatten des Silbergefäfses genau auf jene Metallscheibe fällt. Beobachtet man nun das Steigen des Thermometers während 5 Minuten, so kann man, da das Gewicht des im Gefäfs enthaltenen Wassers bekannt ist, die Anzahl der Wärmeeinheiten angeben, welche die geschwärzte Oberfläche während dieser Zeit von der Sonne empfing. Freilich hat die Kienrufsfläche unterdessen auch Wärme durch Ausstrahlung gegen den Himmelsraum verloren; man bestimmt diesen Verlust, indem man nachher im Schatten das Sinken des Thermometers während 5 Minuten beobachtet, und rechnet ihn der zuerst gefundenen Wärmemenge hinzu. Fügt man ferner noch hinzu den Verlust, welchen die Strahlen beim Durchgang durch die Atmosphäre erleiden, so findet man, dafs die der Erde im Lauf eines Jahres von der Sonne zugestrahlte Wärmemenge im stande sein würde, eine den Erdball umgebende Eisrinde von 30 m Dicke zu schmelzen.

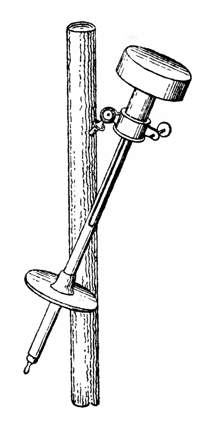


Fig. 370.
Pyrheliometer.

353. **Fresnels Spiegelversuch.** Von einem durch die Sammellinse $L$ (Fig. 371) stark erleuchteten (zur Zeichnungsebene senkrechten) Spalt $P$ fällt Licht auf zwei Spiegel $AB$ und $BC$, welche, damit jeder nur eine spiegelnde Fläche besitze und nur einen Bildpunkt liefere, aus schwarzem Glase bestehen, und bei $B$ unter einem sehr stumpfen Winkel zusammenstofsen. Von dem Spiegel $AB$ werden die Strahlen so zurückgeworfen, als kämen sie von dem Bildpunkte $M$, und von dem Spiegel $BC$ derart, als kämen sie von $N$. Von den Spiegeln gehen demnach zwei Lichtkegel $Mmm'$ und $Nnn'$ aus, welche von den Punkten $M$ und $N$ herzukommen scheinen; sie haben den (in der Figur schraffirten) Raum $Bmn$ miteinander gemeinschaftlich,

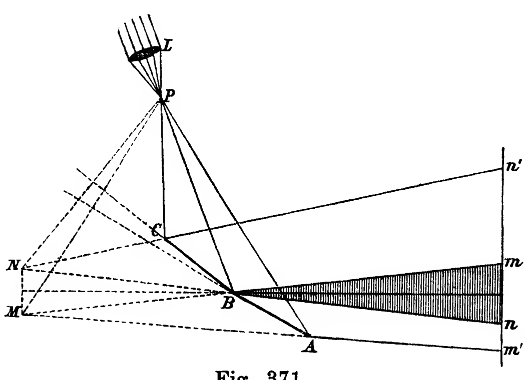



Fig. 371.
Fresnels Spiegelversuch.

so dafs auf dem Schirme $m'n'$ das Feld $mn$ von beiden Lichtkegeln gleichzeitig Licht empfängt. In diesem Mittelfelde nun gewahrt man eine Reihe mit der Kante $B$ paralleler abwechselnd heller und dunkler Streifen; wenn man den einen Spiegel verdeckt, so verschwinden die Streifen, und das Feld $mn$, welches jetzt nur noch von dem anderen Spiegel her Licht erhält, zeigt sich in seiner ganzen Ausdehnung gleichförmig erleuchtet. Die Streifen erscheinen aber sofort wieder, wenn man die Bedeckung wegnimmt und zu dem Lichte, welches der Punkt $M$ auf den Schirm sendet, auch noch dasjenige des Punktes $N$ hinzutreten läfst. Der Fresnelsche Spiegelversuch beweist also, dafs Licht zu Licht gefügt sowohl verstärkte Helligkeit als auch unter Umständen Dunkelheit hervorbringen kann.

Die Annahme, dafs das Licht ein Stoff sei (Newtons Emanations-, Emissions- oder Corpusculartheorie, 1669), dessen Teilchen von den leuchtenden Körpern mit einer Geschwindigkeit von 300000 km fortgeschleudert werden, vermag von dieser Thatsache eine ungezwungene Erklärung nicht zu geben; dagegen ergibt sich die Erscheinung aus der anderen noch möglichen Annahme, dafs das Licht eine Wellenbewegung sei, die sich in einem den Weltenraum und die Zwischenräume der Körperteilchen erfüllenden Mittel, dem sogen. Äther,

mit jener Geschwindigkeit durch Schwingungen von Teilchen zu Teilchen fortpflanzt (Vibrations- oder Undulationstheorie, Huygens, 1678), als notwendige Folgerung, nämlich als Interferenz-Erscheinung (Young, 1801).

Betrachten wir nämlich die Punkte $M$ und $N$ als Ausgangspunkte zweier sich durchkreuzender Wellenzüge (etwa Wasserwellen), deren Wellenberge in der Fig. 372 durch ausgezogene, deren Wellenthäler durch punktirte Kreisbogen angedeutet sind, so wird in den Punkten 0, 2 und 2′, wo zwei Wellenthäler oder zwei Wellenberge zusammentreffen, verstärkte Bewegung, in den Punkten 1, 1′, 3, 3′ aber, wo je ein Wellenberg und ein Wellenthal sich durchkreuzen, Ruhe herrschen. Was aber bei Wasserwellen Ruhe heifst, ist bei den Ätherwellen des Lichts Dunkelheit. Stellen wir uns daher das Licht als eine Wellenbewegung vor, so begreifen wir, dafs auf einem bei 3, 3′ aufgestellten Schirm abwechselnd helle und dunkle Stellen oder vielmehr, da die Lichtwellen nicht nur kreisförmig in einer Ebene, sondern im rings vorhandenen Äther kugelförmig sich ausbreiten, helle und dunkle Streifen auftreten, welche zur gemeinschaftlichen Kante $B$ der beiden Spiegel parallel sind.

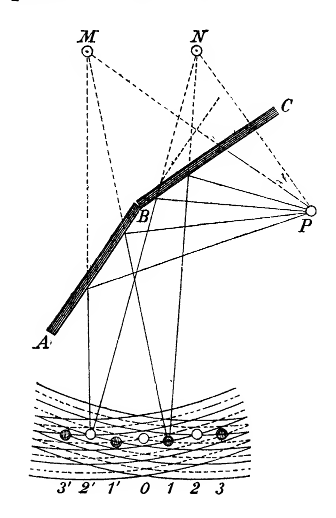



Fig. 372.
Zum Fresnelschen Spiegelversuch.

Fassen wir statt der Wellen selbst die Strahlen ins Auge, welche von den beiden Erregungsmittelpunkten $M$ und $N$ aus in jedem Punkte des Schirmes zusammentreffen, so ist ersichtlich, dafs die beiden Strahlen, welche von $M$ und $N$ nach dem mittleren Punkte 0 gehen, an Länge einander gleich sind; die schwingenden Bewegungen, welche von jenen Centren gleichzeitig ausgehen, treffen daher im Punkte 0 in gleichen Zuständen (Phasen) ein und unterstützen sich gegenseitig zu möglichst lebhafter Wirkung. In dem seitwärts gelegenen Punkte 1 dagegen (und ebenso in 1′) treffen zwei Strahlen zusammen, deren Wege $M1$ und $N1$ um eine halbe Wellenlänge verschieden sind; die Antriebe, welche sie dem Punkte 1 erteilen, sind daher gleich und entgegengesetzt: der Punkt bleibt in Ruhe. Das Gleiche erfolgt an den Stellen 3, 5 u. s. f., wo der Gangunterschied der Strahlen 3 5, u. s. f., überhaupt eine ungerade Anzahl von halben Wellenlängen ausmacht. An den Stellen 2, 4 u. s. f., wo die Strahlen mit Wegunterschieden von einer, zwei u. s. f. oder überhaupt von einer Anzahl ganzer Wellenlängen, also mit gleichen Schwingungszuständen, zusammentreffen, herrscht wieder die lebhafteste Bewegung. Die zwischenliegenden Punkte werden durch Strahlenpaare, welche sich

in allen möglichen Abstufungen des Einklanges und des Gegensatzes befinden, in minder lebhafter Bewegung erhalten.

Man könnte fragen, warum man sich die beiden Lichtcentren *M* und *N* erst auf einem Umweg durch die beiden Spiegel verschafft, und nicht lieber direkt zwei leuchtende Linien, etwa zwei glühende Platindrähte, nimmt. Man würde aber in diesem Falle keine Interferenzstreifen auf dem Schirme erhalten. Denn aus der obigen Betrachtung folgt, daſs die beiden Wellensysteme, damit sie an den angegebenen Stellen des Schirmes interferiren, zu gleicher Zeit und in ganz gleicher Weise von den beiden Erregungscentren ausgehen müssen. Wir haben es aber nicht in unserer Gewalt, den Leuchtprozeſs in zwei leuchtenden Körpern so zu leiten, daſs die schwingende Bewegung, die von dem einen ausgeht, in genauer Übereinstimmung sei mit derjenigen des anderen; in jedem derselben werden nach kurzen Zeiträumen Unterbrechungen der Bewegung, Phasenänderungen und andere Störungen vorkommen, welche nicht gleichzeitig in dem anderen auftreten; die Lichtprozesse in verschiedenen Lichtquellen sind voneinander unabhängig (inkohärent) und deshalb ungleichartig. Die zur Interferenz erforderliche Gleichartigkeit wird nun am sichersten dadurch erreicht, daſs man die beiden Wellensysteme durch Spiegelung oder auf irgend eine andere Art aus der nämlichen Quelle schöpft. Denn die Unregelmäſsigkeiten des Leuchtprozesses in der einen benutzten Lichtquelle treten alsdann übereinstimmend und gleichzeitig in beiden Wellensystemen auf, und können sonach auf den Einklang oder den Gegensatz der Strahlen, der jetzt nur noch durch ihre Wegunterschiede bedingt ist, keinen Einfluſs üben.

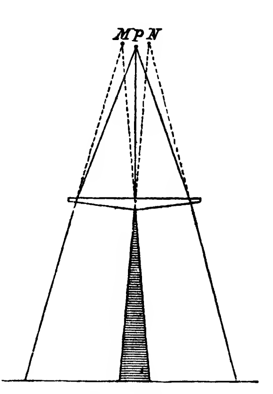



Fig. 373.
Interferenzprisma.

Statt der beiden Spiegel kann man auch das in Fig. 373 im Querschnitt dargestellte stumpfwinklige Doppelprisma aus Glas anwenden, aus welchem die von der Lichtquelle *P* ausgehenden Strahlen so austreten, als ob sie von *M* und *N* herkämen.

Bedeckt man beim Fresnelschen Interferenzversuch die Öffnung des Heliostaten nach der Reihe mit rotem, grünem, blauem Glas, so bemerkt man, daſs im blauen Licht die dunklen Streifen enger beisammen stehen als im grünen Licht, und im grünen enger als im roten. Daraus folgt, daſs blaue Strahlen, um sich gegenseitig aufzuheben, eines geringeren Wegunterschiedes bedürfen als grüne und um so mehr als rote, oder daſs die Wellenlänge des blauen Lichts kleiner ist als die des grünen, und diese kleiner als die des roten Lichts. Überhaupt entspricht jeder einfachen Farbe eine bestimmte in der Reihenfolge der Spektralfarben vom Rot bis zum Violett

immer kleinere Wellenlänge. Stellt man daher den Interferenzversuch mit weifsem Licht an, welches aus allen einfachen Farben gemischt ist, so erscheinen die Streifen auf dem Schirm nicht abwechselnd weifs und schwarz, sondern farbig, weil wegen der Verschiedenheit der Wellenlängen die Streifen verschiedener Farben nicht aufeinander fallen; und da bei gröfseren Gangunterschieden an derselben Stelle des Schirmes immer zahlreichere Verstärkungen und Schwächungen verschiedener Farben sich mischen, so sieht man bei weifsem Licht zu beiden Seiten des mittleren hellen Streifens nur wenige nach aufsen hin immer blasser gefärbte und schliefslich in einförmigem Weifs sich verlierende Streifen. Bei Anwendung von homogenem Lichte dagegen sind die dunklen Streifen vollkommen schwarz und in grofser Anzahl vorhanden.

354. **Wellenlängen. Schwingungszahlen.** Der Fresnelsche Versuch gibt aber nicht blofs im allgemeinen Auskunft über die Verhältnisse der Wellenlängen, sondern kann auch dazu dienen, dieselben zu messen. Ermittelt man nämlich die Längen der von den Lichtpunkten $M$ und $N$ (Fig. 372) nach dem ersten (oder zweiten, dritten) schwarzen Streifen gehenden Strahlen, so mufs ihr Unterschied gleich einer halben (oder 3, 5 u. s. w. halben) Wellenlänge des angewendeten homogenen Lichtes sein. Fresnel hat diese Messungen für Licht, das durch ein rotes Glas gegangen war, durchgeführt und dessen Wellenlänge gleich 638 Milliontel eines Millimeters gefunden.

Nach einer weiterhin zu besprechenden Methode hat man die Wellenlängen für festbestimmte Strahlen, nämlich für die Fraunhoferschen Linien, mit grofser Genauigkeit zu messen vermocht. Die Lichtwellen sind hiernach aufserordentlich klein; auf die Länge eines Millimeters gehen 1315 Wellen des äufsersten Rot (Linie $A$), 1698 Wellen des gelben Natriumlichts ($D$) und 2542 Wellen des äufsersten Violett ($H$).

Nun weifs man, dafs die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts 300000 km beträgt und im freien Äther des Weltalls (im leeren Raume und nahezu auch in der Luft) für alle Lichtarten die gleiche ist. Nachdem die Wellenlängen für die verschiedenen einfachen Lichtarten bekannt sind, lassen sich daher auch ihre Schwingungszahlen mit Leichtigkeit ermitteln; dieselben werden ausgedrückt durch die Anzahl von Wellenlängen, welche je in der Strecke von 300000 km enthalten sind. Für das äufserste Rot z. B., von dessen Wellen 1315 auf die Länge eines Millimeters gehen, findet man so die ungeheure Zahl von 394500000000000 oder beiläufig 395 Billionen Schwingungen in der Sekunde. Je kleiner die Wellenlänge ist, desto gröfser mufs die Schwingungszahl sein; in einem Strahl gelben Natriumlichts macht jedes Ätherteilchen während einer Sekunde 509 Billionen Schwingungen, und dem äufsersten Violett entspricht eine Schwingungszahl von 763 Billionen.

Ein Ton erscheint um so höher, je gröfser seine Schwingungszahl ist. Wie das Ohr die Häufigkeit der Schallschwingungen als

Tonhöhe vernimmt, so empfindet das Auge die Häufigkeit der Lichtschwingungen als Farbe. Damit in unserem Bewufstsein die Empfindung des Gelb der Natriumflamme entstehe, müssen in jeder Sekunde 500 Billionen Ätherwellen in das Auge dringen und auf die Netzhaut treffen. So ist die Farbe eines jeden einfachen Lichtstrahles durch die Anzahl seiner Schwingungen bedingt; die Schwingungszahl ist das unveränderliche Merkmal für das, was wir bei Lichtempfindungen Farbe, bei Schallempfindungen Tonhöhe nennen. Die Farbenfolge des Spektrums ist als eine Art Lichttonleiter anzusehen, welche vom tiefsten unserem Auge wahrnehmbaren Farbenton, dem äufsersten Rot, aufsteigt bis zum höchsten, dem äufsersten Violett. Dem roten Anfang der sichtbaren Farbentonleiter gehen noch voraus die tiefen ultraroten Töne, deren Schwingungen zu langsam sind, um unseren Sehnerv zur Lichtempfindung anzuregen, und jenseits des violetten Endes schliefsen sich an als höchste Töne die ultravioletten, welche auf unser Auge nur einen äufserst schwachen Lichteindruck hervorbringen. In der Musik nennen wir einen Ton die Oktave eines anderen, wenn seine Schwingungszahl doppelt so grofs oder seine Wellenlänge halb so grofs ist als die des letzteren; übertragen wir diese Benennung auf das Gebiet der Farbentöne, so können wir sagen, dafs das sichtbare Spektrum (von $A$ mit der Wellenlänge 0,00076 bis $H$ mit der Wellenlänge 0,00040 mm) nicht ganz eine Oktave ausfüllt. Langley hat das Sonnenspektrum ins Ultrarot hinein verfolgt bis zu einer Wellenlänge von etwa 0,0110 mm; Cornu hat nachgewiesen, dafs es sich ins Ultraviolett hinein bis zur Wellenlänge 0,00030 mm erstreckt. Im ganzen umfafst also das Sonnenspektrum etwas über 5 Oktaven, wovon nahezu 4 auf das Ultrarot entfallen. Die angegebenen Grenzen des Sonnenspektrums sind durch die Durchlässigkeit der Atmosphäre bedingt. Sonnenstrahlen von gröfserer Wellenlänge als 0,0110 mm und kleinerer als 0,00030 mm werden von der Atmosphäre absorbirt und gelangen nicht mehr bis zur Erde. Für irdische Lichtquellen hat man den Bereich der mefsbaren Wellenlängen noch beträchtlich erweitern können. Die längste bisher gemessene Wellenlänge im Ultrarot beträgt 0,0611 mm (Rubens, 1898), die kürzeste im Ultraviolett, gemessen unter Ausschlufs der stark absorbirenden Luft in einem Vakuumspektrographen, beträgt 0,00010 mm (V. Schumann, 1890). Der ganze Bereich der bis jetzt bekannten Strahlung umfafst also etwas mehr als 9 Oktaven.

355. **Das Huygenssche Prinzip**. Während eine Welle sich durch irgend ein Mittel fortpflanzt, ahmt jedes Teilchen die schwingende Bewegung des ursprünglich erregten Teilchens nach. Da nun jedes Teilchen zu den ihm benachbarten in derselben Beziehung steht, wie das erste Teilchen zu seinen Nachbarteilchen, so mufs es auf seine Umgebung die nämliche Wirkung hervorbringen, wie das zuerst erregte, also ebensogut wie dieses der Ausgangspunkt eines Wellensystems sein. Die unzählig vielen gleichzeitig vorhandenen Teilwellen-

systeme, welche von sämtlichen in Bewegung befindlichen Teilchen ausgehen, bringen aber durch ihr Zusammenwirken (ihre Übereinanderlagerung) genau das Hauptwellensystem hervor, welches, rings um den Erregungsmittelpunkt sich ausbreitend, thatsächlich vorhanden ist. Dieser wichtige Satz, welchen man das Huygenssche Prinzip nennt, enthüllt den wahren Vorgang bei der Fortpflanzung der Wellen in einem allseitig ausgebreiteten Mittel, indem er den gegenseitigen Wirkungen der Teilchen, welche rings um jedes Teilchen in gleicher Weise stattfinden, gebührende Rechnung trägt. In einem solchen Mittel kann eine Fortpflanzung der schwingenden Bewegung längs einer einzigen geraden Linie offenbar nicht stattfinden; immer wird es sich um die Fortpflanzung einer Welle oder eines Wellenstückes handeln. Zu jedem Wellenstücke aber, wie klein man sich dasselbe auch vorstellen mag, gehören unzählig viele Strahlen, welche zusammen ein Strahlenbündel ausmachen. In der Natur kommen niemals vereinzelte Strahlen, sondern nur Strahlenbündel vor. Die bisher unter der Annahme einzelner Lichtstrahlen durchgeführten Betrachtungen behalten gleichwohl ihre volle Geltung, wenn wir nur in jedem Lichtstrahle den Repräsentanten des sehr dünnen Strahlenbündels erblicken, zu dem er gehört.

Da in einem nach allen Richtungen gleichbeschaffenen Mittel die Wellen, z. B. die Schallwellen in der Luft, die Lichtwellen im Äther, sich um den Erregungsmittelpunkt als Kugelschalen ausbreiten, so steht jeder Strahl als Kugelhalbmesser auf dem zugehörigen Wellenstückchen senkrecht. Denkt man sich dieses Wellenstückchen sehr klein oder sehr weit vom Erregungspunkt entfernt, so können die auf ihm senkrechten Strahlen als unter sich parallel und das Wellenstückchen selbst als eine ebene Fläche betrachtet werden. Überhaupt gehört zu einem Bündel paralleler (und unter sich kohärenter) Strahlen stets eine ebene Welle, welche zur Richtung der Strahlen senkrecht steht.

356. **Erklärung der Zurückwerfung und Brechung.** Sehen wir nun, was geschieht, wenn ein Bündel paralleler Strahlen $ama''k$ auf die ebene Trennungsfläche $mk$ zweier verschiedenartiger Mittel trifft (Fig. 374). Indem die zu dem Strahlenbündel gehörige ebene Welle $mn$ gegen die Fläche fortschreitet, setz si nach und nach die an der Oberfläche liegenden Teilchen $mm'k$ in schwingende Bewegung, und jedes derselben entsendet (dem Huygensschen Prinzip gemäfs) sein eigenes Wellensystem in das erste Mittel zurück. In dem Augenblicke, in welchem der Punkt $k$ der Fläche von der einfallenden Welle erreicht wird, hat der zuerst getroffene Punkt $m$ eine kreis- oder kugelförmige Teilwelle hervorgerufen, welche sich rings um $m$ ebensoweit ausgebreitet hat, als die Hauptwelle mittlerweile fortgeschritten ist, deren Halbmesser $mo$ sonach gleich der Strecke $nk$ ist. Die zwischen $m$ und $k$ gelegenen Punkte haben inzwischen ebenfalls Teilwellen (Elementarwellen) erzeugt, deren Halbmesser um so kleiner sind, je näher sie dem augenblicklich noch in Ruhe befind-

lichen Punkt $k$ liegen, der Punkt $m'$ z. B. eine Welle, deren Halbmesser $m'o'$ gleich $kn'$ ist. Die gemeinschaftliche Berührungslinie $ko$ sämtlicher Teilwellen, an welcher alle Bewegungen mit gleichen Schwingungszuständen eintreffen, stellt nun wieder eine Hauptwelle dar, welche von der Trennungsfläche in das erste Mittel zurückgeht, oder, wie man sagt, an dieser Fläche zurückgeworfen wurde. Wie man sieht, ist die zurückgeworfene Welle $ko$ gegen die zurückwerfende Fläche $mk$ unter dem nämlichen Winkel geneigt, wie die einfallende. Das zugehörige zurückgeworfene Strahlenbündel $mlkr$, dessen Strahlen $ml$, $m's$, $kr$ zu der Welle $ko$ senkrecht stehen, bildet mithin ebenfalls mit der Fläche $mk$ und folglich auch mit

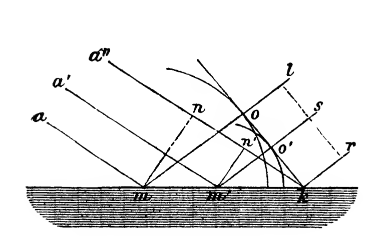


Fig. 374.
Erklärung der Zurückwerfung.

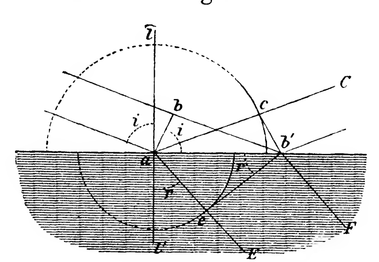


Fig. 375.
Erklärung der Brechung.

einer auf ihr errichteten Senkrechten, dem Einfallslot, den nämlichen Winkel wie das einfallende Strahlenbündel.

Von den durch die ankommende Welle erschütterten Punkten der Trennungsfläche aus müssen aber auch Wellen in dem zweiten Mittel erregt werden, welche sich jedoch mit einer anderen Geschwindigkeit fortpflanzen als im ersten Mittel. Die von dem Punkt $a$ (Fig. 375), welcher von der einfallenden Welle $ab$ zuerst getroffen wird, ausgehende Teilwelle wird daher in dem Augenblick, in welchem die einfallende Welle den Punkt $b'$ erreicht, einen Halbmesser $ae$ besitzen, welcher zu der gleichzeitig im ersten Mittel zurückgelegten Strecke $bb'$ in demselben Verhältnis steht wie die Fortpflanzungsgeschwindigkeit im zweiten zu derjenigen im ersten Mittel. Da die von $b'$ aus an diese erste Teilwelle gezogene Berührungslinie $b'e$ auch alle übrigen bis jetzt gebildeten Teilwellen berührt und sonach ihre Bewegungen zusammenfaſst, so stellt sie die ins zweite Mittel eindringende ebene Hauptwelle vor. Wie man sieht, hat die Welle beim Übertritt in das andere Mittel eine Schwenkung gemacht; ihre Front rückt in anderer Richtung vor als diejenige der einfallenden Welle. Das zu ihr gehörige Strahlenbündel $aEb'F$ bildet daher mit dem Einfallslot $lal'$ einen anderen Winkel als das einfallende Strahlenbündel; es hat eine Brechung erlitten. Wenn, wie in der Figur angenommen wurde, die Fortpflanzungsgeschwindigkeit im zweiten Mittel kleiner ist als im ersten, so ist der Brechungswinkel $r$ kleiner als der Einfallswinkel $i$, oder das Strahlenbündel wird zum Lot ge-

brochen. Nimmt man die Strecke *ab'* als Längeneinheit an, so ist *bb'* der Sinus des Einfallswinkels *i* und *ae* der Sinus des Brechungswinkels *r*. Die Längen *bb'* und *ae* stehen aber zu einander in dem unabänderlichen Verhältnis der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten des Lichts im ersten und im zweiten Mittel; aus der Wellenlehre folgt also nicht nur das Brechungsgesetz, dafs der Sinus des Einfallswinkels zum Sinus des Brechungswinkels in einem unveränderlichen Verhältnis steht, sondern auch die eigentliche Bedeutung dieses Verhältnisses; der Brechungskoëfficient ist das Verhältnis der Fortpflanzungsgeschwindigkeit im ersten Mittel zu derjenigen im zweiten. Hiermit ergibt sich aus der Wellenlehre zugleich als notwendige Folge, dafs sich das Licht im stärker brechenden Mittel langsamer fortpflanzt als im schwächer brechenden. Die Emanationshypothese dagegen, welche die Brechung aus einer Anziehung der Teilchen des brechenden Körpers auf die Teilchen des vermeintlichen Lichtstoffs erklärte, kam zu der Folgerung, dafs sich das Licht in dem stärker brechenden Mittel schneller fortpflanze als in dem schwächer brechenden. Der Widerspruch, welcher in diesen entgegengesetzten Folgerungen zu Tage trat, bot Gelegenheit, den lange geführten Kampf zwischen Lichtstoff- und Wellenlehre endgültig zu entscheiden. Foucault gelang dies (1850) durch folgende sinnreiche Anordnung, welche die Geschwindigkeit des Lichts selbst im engen Raume eines Zimmers zu messen gestattet (320). Von einer Öffnung *O* (Fig. 376) aus fällt ein Bündel Lichtstrahlen durch die unter 45° geneigte Glasplatte *P* auf einen kleinen ebenen Spiegel *S*, wird von da auf einen Hohlspiegel *H*, dessen Radius *HS* ist, zurückgeworfen und kehrt auf dem Wege *SP* nach der Glasplatte zurück, die ihn nach seitwärts (*Po*) dem Beobachter zulenkt. Dreht sich der Spiegel sehr rasch um eine zur Ebene der Figur senkrechte Achse, so dafs er, nachdem das Licht den Weg *SH* hin und zurück durchlaufen hat, seine Lage etwas geändert hat, so geht der von ihm zurückgeworfene Strahl nach *SP'* und zeigt dem Beobachter das Bild *o* der Öffnung nach *o'* verschoben. Aus der Verschiebung und der mefsbaren Drehungsgeschwindigkeit des Spiegels *S* ergibt sich die Zeit, welche das Licht bedurfte, um den Weg *HS* hin und zurück zu durchlaufen. Wurde zwischen *S* und *H* eine mit Wasser gefüllte an den Enden durch Glasplatten verschlossene Röhre *R* eingeschaltet, so ergab sich die Verschiebung *oo'* gröfser; das Licht pflanzt sich also in Wasser langsamer fort als in Luft, und zwar ergab sich seine Geschwindigkeit im Wasser nur zu $^3/_4$ von derjenigen in der Luft.

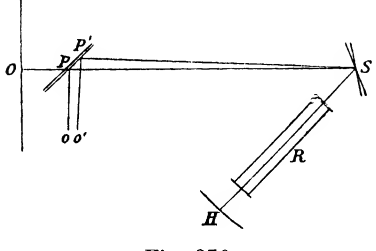


Fig. 376.
Foucaults Versuch.

Der oben für den leeren Raum gewonnene Satz, dafs alle Lichtarten sich mit gleicher Geschwindigkeit fortpflanzen, gilt hiernach nicht mehr für die Fortpflanzung in undurchsichtigen Körpern; denn die Thatsache der Farbenzerstreuung, in die Sprache der Wellenlehre gefafst, sagt uns, dafs in farblos durchsichtigen Substanzen Strahlen von gröfserer Schwingungszahl sich mit geringerer Geschwindigkeit fortpflanzen. In der atmosphärischen Luft allerdings und überhaupt in gasförmigen Körpern ist die Farbenzerstreuung sehr unbedeutend. Das mittlere Brechungsverhältnis beim Übergang aus dem leeren Raum in Luft von 0° und 760 mm Druck ist 1,000295. Für rotes Licht ist dieser Wert 1,000293, für blaues 1,000297.

Die Dispersionserscheinungen stehen im engsten Zusammenhange mit der Absorption. Untersucht man die Brechung des Lichts für die verschiedenen Farben an einem Körper, der einen Teil des Spektrums stark absorbirt, z. B. an Cyanin, das einen starken Absorptionsstreifen im hellsten Teil des Spektrums hat, so findet man, dafs die Brechungsexponenten im Rot nach dem Absorptionsstreifen zu sehr stark anwachsen. Jenseits des Absorptionsstreifens aber findet man im Grün Brechungsexponenten, die viel kleiner sind als die im Rot, und nach dem Blau hin allmählich wieder zunehmen. Dieser Stoff also zeigt nicht das regelmäfsige Ansteigen der Dispersion nach dem Violett zu, sondern bricht das Blau weniger stark als das Rot. Ähnliches zeigen andere Stoffe mit starker auswählender Absorption. Man bezeichnet diese Erscheinung als anomale Dispersion (Christiansen, Kundt) und hat eine Theorie dieser Erscheinungen aufzustellen versucht (Sellmeyer, Helmholtz), welche von der Vorstellung ausgeht, dafs in den Körpern Teilchen vorhanden sind, die von den hindurchgehenden Lichtwellen zum Mitschwingen angeregt werden, sei es, dafs man sich unter diesen Teilchen die Atome oder Moleküle der Körper selbst vorstellt, oder, was nach der heutigen Auffassung wahrscheinlicher ist, elektrische Ladungen, die etwa in Form von Elektronen (268) mit den Atomen oder Molekülen des Körpers verbunden sind. Diese Teilchen werden selbst bestimmte Eigenschwingungen besitzen und werden von denjenigen Lichtwellen am stärksten erregt werden, welche in den Schwingungsperioden mit ihnen übereinstimmen; die Energie dieser Lichtwellen wird daher von dem Körper am stärksten aufgenommen oder absorbirt werden. Diese Lichtart entspricht dem Absorptionsstreifen. Für die dem Absorptionsgebiet benachbarten Lichtarten aber folgt aus dieser Theorie in der That eine derartige Beeinflussung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit, wie sie in den Erscheinungen der anomalen Dispersion beobachtet wird, eine starke Erhöhung des Brechungsexponenten auf der roten, eine starke Erniedrigung auf der blauen Seite des Absorptionsgebietes. Die Dispersion der farblosen Mittel aber folgt ebenfalls aus dieser Theorie, wenn man solche Lichtarten in Betracht zieht, die weit von dem Absorptionsgebiet entfernt liegen, sei es, dafs für die durchsichtigen Mittel das Absorptionsgebiet im Ultraroten oder im Ultravioletten liegt, oder auf beiden Seiten; denn es sind natürlich auch mehrere Absorptionsgebiete denkbar, entsprechend mehreren Arten von mitschwingenden Teilchen.

Gleichungen, welche die Beziehung zwischen dem Brechungsexponenten und der Wellenlänge ausdrücken, sind auf Grund der angedeuteten Anschauung von Ketteler, Helmholtz und anderen aufgestellt worden. Man nennt sie Dispersionsformeln. Eine einfache Gleichung dieser Art ist die folgende (Lommel, 1877):

$$n^2 - 1 = \frac{a}{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda}\right)^2},$$

in der $a$ und $\lambda_0$ für jeden Körper konstante Zahlen sind. Ist $\lambda_0$ klein gegen $\lambda$, so kann man sie in die zur Rechnung bequeme Form bringen:

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2},$$

(Cauchy, 1836), wo $A$ und $B$ Konstanten sind.

Wie für die Tonhöhe eines Klanges, so ist auch für die Farbe einer homogenen Lichtart das kennzeichnende Merkmal die Schwingungszahl, welche sich beim Übergang des Lichts aus einem Mittel in ein anderes nicht ändert. Wohl aber ändert sich dabei die Wellenlänge; denn diese wird ja stets erhalten, indem man die von Mittel zu Mittel und von Farbe zu Farbe sich ändernde Fortpflanzungsgeschwindigkeit durch die unverändert bleibende Schwingungszahl dividirt. Statt der Schwingungszahlen gibt man jedoch gewöhnlich die der Messung unmittelbar zugänglichen Wellenlängen in der Luft als Merkmale der homogenen Lichtarten an, und findet daraus die Wellenlängen in einer beliebigen Substanz, wenn man die für die Luft bestimmten Wellenlängen durch die zugehörigen Brechungsverhältnisse dividirt.

357. **Dopplersches Prinzip.** Dennoch ist ein Fall denkbar, in welchem eine Änderung der Schwingungszahl eintritt. Doppler machte schon 1841 darauf aufmerksam, daſs die Höhe eines Tones oder die Farbe eines Lichteindrucks sich erhöhen oder erniedrigen müsse, wenn der tönende oder der leuchtende Körper sich dem Beobachter nähert oder sich von ihm entfernt. Im ersteren Falle wird nämlich das Sinnesorgan innerhalb einer Sekunde von einer gröſseren Anzahl, im letzteren Falle von einer kleineren Anzahl Wellen getroffen, als wenn die Ton- oder Lichtquelle stille steht. Beim Durchgange eines Eilzuges an einer Eisenbahnstation beobachtet man in der That, daſs der Pfiff der Lokomotive beim Hereinfahren des Zuges höher, beim Hinausfahren aber tiefer klingt, als wenn der Zug hält.

Stellen wir uns nun etwa vor, daſs im Weltenraum eine Kugel glühenden Natriumdampfes sich mit hinlänglicher Geschwindigkeit gegen unsere Erde bewege, so müſste uns ihr Licht mehr grünlich erscheinen als dasjenige einer irdischen Natriumflamme; und wenn sie sich entfernte, müſste es mehr ins rötliche spielen. Und wenn dieses Licht auf ein Prisma fiele, so würde es an demselben im ersteren Falle mit gröſserer, im letzteren Falle mit kleinerer Schwingungszahl anlangen als dasjenige einer ruhenden Natriumflamme, und dementsprechend stärker oder schwächer gebrochen werden. In einem nach der bewegten Lichtquelle gerichteten Spektroskop müſste man daher die helle Natriumlinie nach dem brechbareren oder nach dem weniger brechbaren Ende des Spektrums verschoben sehen, je nachdem sich die Lichtquelle dem Beobachter nähert oder von ihm entfernt. In gleicher Weise wie die helle Natriumlinie in diesem angenommenen Beispiel werden die dunklen Linien im Spektrum eines Fixsternes sich verschieben und nicht mehr zusammenfallen mit den hellen Linien der einfachen Stoffe, durch deren absorbirende Wirkung sie entstehen,

wenn der Fixstern in der Richtung der Sehlinie sich mit hinreichender Schnelligkeit bewegt. Aus dem Sinne und aus dem Betrage der Verschiebung kann alsdann Richtung und Gröfse der in die Sehlinie fallenden Komponente der Geschwindigkeit des Sternes ermittelt werden. So fand **Huggins** durch Vergleichung der *F*-Linie des Siriusspektrums mit der entsprechenden blaugrünen Linie im Spektrum einer mit Wasserstoff gefüllten Geifslerschen Röhre, dafs sich der Sirius mit einer Geschwindigkeit von 48 km von unserem Sonnensystem entfernt, und Lockyer schlofs aus eigentümlichen Verschiebungen und Verzerrungen der *F*-Linie des Sonnenspektrums, dafs die glühenden Wasserstoffmassen der Sonnenatmosphäre in Wirbelstürmen von 50 bis 60 km/sec Geschwindigkeit sich drehen.

358. **Beugung** (Diffraktion, Inflexion) **des Lichts** (Grimaldi, 1665). Schaut man blinzelnd nach einer etwas entfernten Kerzenflamme, so sieht man zu beiden Seiten derselben eine Reihe von farbigen Flammenbildern; ähnliche Erscheinungen gewahrt man, wenn man bei Nacht die Strafsenlaternen durch das Gewebe eines Regenschirms blinken sieht, oder wenn man das helle Spiegelbildchen der Sonne auf einem Uhrglas durch die Fahne einer Sperlingsfeder betrachtet; im letzteren Fall z. B. erblickt man den Lichtpunkt inmitten eines schiefen Kreuzes, dessen Arme aus einer Reihe mit den Regenbogenfarben geschmückter Lichtbilder zusammengesetzt sind. Um diese Erscheinungen seitlich von der Lichtquelle hervorzubringen, mufs ein Teil des Lichts beim Durchgang durch die engen Zwischenräume zwischen den Augenwimpern, zwischen den Fäden des Gewebes, zwischen den Fäserchen der Feder von seinem geraden Weg nach dem Auge seitwärts abgelenkt oder, wie man sagt, „gebeugt“ worden sein. Die einfachste und daher zur Erforschung geeignetste Beugungserscheinung erhält man, wenn man die durch eine schmale lotrechte Öffnung mittels eines Spiegels ins dunkle Zimmer gelenkten Sonnenstrahlen durch einen engen Spalt gehen läfst und hinter diesem auf einem etwas entfernten Schirm auffängt. Hat man, um nur rotes Licht einzulassen, die Öffnung mit einem roten Glas bedeckt, so erblickt man auf dem Schirm zu beiden Seiten des hellen Lichtstreifens, der, wie zu erwarten, in der geradlinigen Richtung der einfallenden Strahlen sich zeigt, je eine Reihe abwechselnd schwarzer und heller Streifen (Fig. 377), welch letztere nach aufsen hin an Lichtstärke rasch abnehmen. Das Auftreten von völlig dunkeln Streifen an Stellen, welche ebensogut wie die zwischenliegenden hellen Stellen von Lichtstrahlen getroffen werden, liefert uns abermals den Beweis, dafs das Licht eine Wellenbewegung ist; denn nur unter dieser Voraussetzung läfst es sich begreifen, dafs Lichtstrahlen, mit Lichtstrahlen zusammenwirkend (interferirend), Dunkelheit hervorbringen können. Die Wellenlehre gibt in der That von der Erscheinung befriedigende Rechenschaft. Alle Punkte des Wellenstücks *CD* (Fig. 378), welches, von der Öffnung im Fensterladen kommend, den Spalt ausfüllt, befinden sich in gleichem Schwingungs-

zustand. Jeder dieser Punkte ist nach dem Huygensschen Prinzip wieder als Ursprung einer Welle anzusehen, welche sich um ihn hinter dem Spalt nach allen Seiten ausbreitet, oder als Ausgangspunkt von Strahlen, die nach allen Richtungen von ihm ausstrahlen. Die seitliche Ausbreitung des Lichts, welche man auf dem Schirm wahrnimmt, erklärt sich also unmittelbar aus dem Wesen der Wellenbewegung. Diejenigen unter den Strahlen wie *CG*, welche die Fortsetzung der einfallenden Strahlen *cC*, *dD* bilden, befinden sich wie diese in gleichen Schwingungszuständen; sie werden daher auf dem entfernten Schirm, wo sie alle gleichzeitig mit ihren Wellenbergen oder gleichzeitig mit ihren Wellenthälern zusammentreffen, sich gegenseitig in ihrer Wirkung unterstützen und die erhöhte Lichtstärke in der Mitte des Beugungsbildes erzeugen. Betrachten wir dagegen das gebeugte Strahlenbündel *CEDF*, welches nach einem seitlich gelegenen Punkte des entfernten Schirms hinzielt, so haben die Strahlen desselben (man kann sie, weil dieser Punkt im Verhältnis zu der geringen Breite des Spalts sehr weit entfernt ist, als unter sich nahezu parallel an-

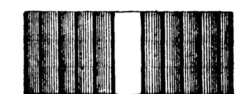


Fig. 377.
**Beugungsbild eines engen Spalts.**

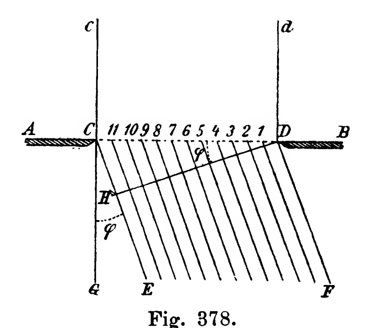



Fig. 378.
**Erklärung der Beugung.**

sehen) von dem Wellenstück *CD* bis zum Schirmpunkt verschiedene Wege zurückzulegen und können daher im allgemeinen dort nicht mit gleichen Schwingungszuständen anlangen. Zieht man von *D* aus die Linie *DH* senkrecht zum Strahl *CE*, so ist *CH* die Strecke, um welche der Randstrahl *CE* hinter dem Randstrahl *DF* zurückbleibt. Beträgt dieser Gangunterschied *CH* eine ganze Wellenlänge, so ist der mittlere Strahl (6) des Bündels gegen den Strahl *DF* um eine halbe Wellenlänge verzögert; er erzeugt daher in dem Schirmpunkt ein Wellenthal, wenn dieser einen Wellenberg erzeugt, und umgekehrt. Diese beiden Strahlen befinden sich also vermöge ihres Gangunterschieds von einer halben Wellenlänge in gerade entgegengesetzten Bewegungszuständen und heben ihre Wirkung gegenseitig auf; überhaupt läfst sich zu jedem Strahl, welcher der Hälfte *D*6 des Bündels angehört, in der anderen Hälfte *C*6 ein entsprechender Strahl finden, der gegen jenen um eine halbe Wellenlänge zurück ist, z. B. 1 und 7, 2 und 8, 3 und 9 u. s. f. Die Strahlen dieses Bündels vernichten sich also paarweise, und an der Stelle des Schirms, wo dieses Bündel hintrifft, mufs Dunkelheit herrschen. Beträgt für ein noch schrägeres Strahlenbündel, welches nach einem noch weiter seitwärts gelegenen

Punkte des Schirms hingeht, der Gangunterschied der Randstrahlen zwei ganze Wellenlängen, so kann man das Bündel in zwei Hälften $C6$ und $D6$ geteilt denken, deren Randstrahlen je um eine ganze Wellenlänge verschieden sind und welche daher jede für sich verschwinden. So fortschliefsend erkennt man, dafs dunkle Streifen an allen jenen Stellen des Schirms auftreten, für welche der Gangunterschied der Randstrahlen einer Anzahl von ganzen Wellenlängen gleich ist. An den dazwischen liegenden Stellen aber, für welche der Unterschied der Randstrahlen ein anderer ist, werden sich die Strahlen nicht vollständig auslöschen können; zwischen den dunklen Streifen erscheinen daher helle Rechtecke, deren Lichtstärke nach aufsen hin freilich rasch abnimmt. Nehmen wir statt des roten ein grünes Glas, so erhalten wir statt der roten grüne Rechtecke, welche aber schmaler und näher zusammengerückt sind als die roten, und bei Anwendung eines blauen Glases rücken die Streifen noch näher aneinander. Nun ist aber klar, dafs, je kürzer die Wellenlänge ist, desto geringer die Neigung der gebeugten Strahlen zu sein braucht, um den für den gleichvielten Streifen notwendigen Gangunterschied hervorzubringen. Dafs die schwarzen Streifen beim blauen Lichte der Mitte des Beugungsbildes näher sind als beim roten, beweist wiederum, dafs den einfachen Farben des Spektrums nach der Reihenfolge vom Rot bis zum Violett eine immer kleinere Wellenlänge entspricht, deren Gröfse ($\lambda$) aus der Beugungserscheinung selbst leicht entnommen werden kann. Denn hat man die Breite des Spalts $CD = b$ mikrometrisch und den „Beugungswinkel“ $ECG = CDH = \varphi$, den die nach dem ($n$ten) Streifen gehenden gebeugten Strahlen mit den direkten Strahlen bilden, goniometrisch gemessen, so mufs $CH$ gleich $n$ Wellenlängen sein, oder es mufs $n\lambda = b \sin \varphi$ sein.

Lassen wir weifses Licht, das aus allen Farben zusammengesetzt ist, durch die Öffnung des Fensterladens eintreten, so können die seitlichen Rechtecke und die dunkeln Streifen für die verschiedenen Farben nicht zusammenfallen, und wir erblicken auf dem Schirm zu beiden Seiten der weifsen Mitte eine Reihe von vielfarbigen Bändern, welche durch lichtschwächere ebenfalls gefärbte Streifen voneinander getrennt sind.

Macht man den Spalt nach und nach weiter, so werden die nämlichen Gangunterschiede bei immer kleineren Neigungen der gebeugten Strahlen eintreten, die Streifen rücken immer enger zusammen, bis sie endlich so fein werden, dafs sie der Wahrnehmung entgehen. Man mufs daher, um Beugungserscheinungen wahrzunehmen, stets sehr enge Öffnungen anwenden. Die Bilder, welche man erblickt, sind je nach der Form der Öffnung mannigfach gestaltet und häufig von bewundernswerter Zierlichkeit. Betrachtet man z. B. durch eine rautenförmige Öffnung das glänzende Sonnenbildchen auf einem polirten Metallknopf, so erblickt man ein aus Rauten, welche in den Regenbogenfarben erglänzen, zusammengesetztes schiefes Kreuz. Ist die Öffnung kreisrund, so sieht man ein von mehreren farbigen

Ringen umgebenes Lichtscheibchen. Durch eine dreieckige Öffnung erblickt man einen sechsstrahligen Stern, in dessen Winkeln viele kleine Lichtbildchen flimmern. Wendet man zwei oder mehrere Öffnungen von gleicher Form und Gröfse an, so erscheinen die vorigen Gestalten noch vielfach von dunkeln Streifen durchschnitten und in noch kleinere Lichtbilder abgeteilt. Wie verwickelt und zusammengesetzt aber diese Bilder auch erscheinen mögen, sie lassen sich aus der Wellentheorie stets aufs genaueste berechnen (Schwerd, 1835) und dienen ihr daher zur vollkommensten Bestätigung. Insbesondere bewahrheitet sich auch der als Babinets Prinzip bezeichnete Satz, dafs ein undurchsichtiges Schirmchen dieselbe Beugungserscheinung ergibt, wie eine gleichgestaltete Öffnung.

359. **Gitter.** Die prachtvollsten aller Beugungserscheinungen werden durch die Gitter (Fraunhofer, 1821) hervorgebracht; so

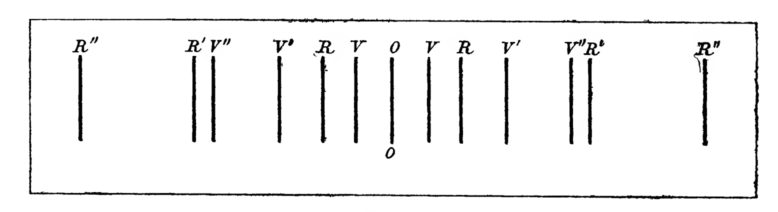



Fig. 379.
Entstehung der Gitterspektren.

nennt man eine zahlreiche Reihe paralleler schmaler Spalte, welche man erzeugt, indem man entweder feine Drähte in einem Rähmchen in gleichen Abständen nebeneinander spannt (Drahtgitter), oder feine parallele Streifen auf einer berufsten Glasplatte mit der Teilmaschine zieht (Rufsgitter), oder mit einem Diamanten auf eine Glasplatte (Glasgitter) oder auf eine spiegelnde Metallfläche (Rowlands Reflexionsgitter) ritzt. Fällt auf ein solches Gitter einfaches Licht, z. B. rotes, welches vorher durch einen Spalt gegangen ist, so wird eine hinter dem Gitter aufgestellte Sammellinse die direkt vom Spalt kommenden Strahlen auf einem dem Spalt zugeordneten (330) Schirm zu einem schmalen Bild $OO$ (Fig. 379) des Spalts vereinigen. Diese Strahlen haben, da eine Linse zwischen zugeordneten Punkten keine Gangunterschiede hervorruft, bis zum Bild $OO$ alle den gleichen Weg zurückzulegen und treffen daselbst ohne Gangunterschied zusammen. Die gebeugten Strahlen bestehen für jede Beugungsrichtung

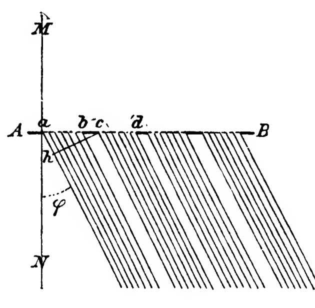



Fig. 380.
Beugung durch ein Gitter.

aus ebenso vielen unter sich gleichen Strahlenbündeln (Fig. 380), als Öffnungen im Gitter vorhanden sind; je zwei benachbarte Bündel haben unter sich einen um so gröſseren Gangunterschied ($ah$), je gröſser ihre Abweichung von den direkten Strahlen (der Beugungswinkel $\varphi$) ist, oder je weiter die Stelle des Schirms, wo alle zu dieser Richtung gehörigen Strahlen vereinigt werden, von der Mitte $OO$ absteht. Nun muſs es eine gewisse Beugungsrichtung geben, für welche der Gangunterschied je zweier Nachbarbündel eine ganze Wellenlänge des roten Lichts beträgt. In dieser Richtung müssen sich daher sämtliche Bündel gegenseitig verstärken, und an der entsprechenden Stelle des Schirms wird ein schmales rotes Spaltbild $R$ auftreten. Entfernt man sich aber nur sehr wenig aus dieser Richtung, so müssen sich, wenn das Gitter hinlänglich viele Striche enthält, sämtliche Strahlenbündel bei ihrer Vereinigung gegenseitig vernichten. Denn nimmt z. B. bei einem Gitter von 100 Strichen der Beugungswinkel nur um soviel zu, daſs das erste Bündel um $1 + {}^1/_{100}$ Wellenlänge gegen das zweite verzögert ist, so bleibt es gegen das dritte um $2 + {}^2/_{100}$, gegen das vierte um $3 + {}^3/_{100}$ etc., gegen das 51. um $50 + {}^{50}/_{100}$ oder um $50 + {}^1/_2$ Wellenlängen zurück. Das 51. Bündel befindet sich also mit dem 1. in entgegengesetztem Bewegungszustand, ebenso das 52. mit dem 2., das 53. mit dem 3. etc., endlich das 100. mit dem 50. Daraus geht hervor, daſs sich die gebeugten Strahlen in jeder Richtung vernichten, auſser in jenen Richtungen, für welche der Gangunterschied je zweier Nachbarbündel eine ganze Anzahl von Wellenlängen ausmacht. Das Beugungsbild auf dem Schirm wird sich daher für homogenes rotes Licht sehr einfach gestalten. In der Mitte erscheint das Bild $O$ des Spalts; dann folgt auf jeder Seite in einer Entfernung, welche dem Gangunterschied einer ganzen Wellenlänge dieses roten Lichts entspricht, eine schmale rote Linie $R$, dann in doppeltem Abstand, dem Gangunterschied von zwei Wellenlängen entsprechend, eine zweite rote Linie $R'$, und weitere noch im dreifachen ($R''$), vierfachen etc. Abstand. Für violettes Licht würde man in gleicher Weise eine Reihe violetter Linien erhalten, welche aber infolge der kürzeren Wellenlänge dieser Lichtgattung dem Spaltbild $OO$ näher, nämlich bei $V$, $V'$, $V''$, liegen. Bei Anwendung von weiſsem Licht erscheint das mittlere Spaltbild weiſs, weil hier alle Farben sich aufeinanderlegen und vermischen; die durch Beugung entstandenen verschiedenfarbigen Linien aber, welche z. B. dem Gangunterschied von je einer Wellenlänge angehören, legen sich nach der Reihenfolge der Wellenlängen nebeneinander und bilden zu jeder Seite des weiſsen Spaltbildes ein prachtvolles Farbenband, welches von auſsen nach innen die bekannte Reihenfolge der Regenbogenfarben, Rot, Orange, Gelb, Grün, Hellblau, Dunkelblau, Violett zeigt, das erste Gitterspektrum $VR$; ebenso bilden die Strahlen höherer Gangunterschiede das zweite ($V'R'$), dritte ($V''R''$) etc. Gitterspektrum. In einem durch ein Prisma entworfenen Spektrum ist die verhältnismäſsige Ausbreitung der Farben

von dem Stoff des Prismas abhängig[1]); in einem Gitterspektrum aber sind die einfachen Farben lediglich nach den Unterschieden ihrer Wellenlängen geordnet, also nach einem Merkmal, welches den Strahlen an und für sich eigen ist. Das Gitterspektrum ist daher als das normale oder typische Spektrum anzusehen. Bei Anwendung von Sonnenlicht zeigen sich auch im Gitterspektrum die Fraunhoferschen Linien, jede an der Stelle, welche ihr vermöge ihrer Wellenlänge zukommt. Beobachtet man das Gitterspektrum mittels eines auf einem geteilten Kreis drehbaren Fernrohrs (341), so kann man den Winkelabstand jeder Fraunhoferschen Linie vom mittleren Spaltbild (den Beugungswinkel $\varphi$) messen und daraus unter Berücksichtigung des bekannten Abstandes je zweier Gitterstriche (Gitterkonstante $e$) die zugehörige Wellenlänge ($\lambda$) ermitteln; für das $n$te Spektrum ist nämlich $n\lambda = e \sin \varphi$. Die folgende kleine Tabelle enthält die nach diesem Verfahren gefundenen Wellenlängen für die Fraunhoferschen Linien, ausgedrückt in Millionteln eines Millimeters:

| | | | |
|---|---|---|---|
| $A$ | 760 | $b$ | 518 |
| $a$ | 718 | $F$ | 486 |
| $B$ | 687 | $G$ | 431 |
| $C$ | 656 | $H_1$ | 397 |
| $D$ | 589 | $H_2$ | 393 |
| $E$ | 527 | | |

Da für das Licht der $C$-Linie $2\lambda = 1312$, für das der $G$-Linie $3\lambda = 1293$ ist, so ersieht man daraus, dafs die Ablenkung für das Rot in der zweiten Ordnung ebensogrofs ist wie für das Violett in der dritten Ordnung. Das blaue Ende des 3. Spektrums lagert sich daher über das rote Ende des 2. In den höheren Ordnungen lagern sich die Spektren mehr und mehr übereinander.

Wie im durchgehenden Lichte so treten auch bei Reflexion an Gittern Beugungsspektren auf. Die vorzüglichsten Beugungsgitter, mit denen die zuverlässigsten Messungen der Wellenlängen ausgeführt worden sind, hat Rowland auf Spiegelmetall hergestellt. Das feinste Gitter dieser Art enthält 1700 Linien auf 1 mm. Statt auf eine ebene hat Rowland diese Gitter auch auf eine Hohlspiegelfläche geritzt. Solche Gitter entwerfen von einem Spalt reelle Spektren ohne Anwendung von Linsen (Konkavgitter).

Das perlmutterähnliche Farbenspiel, das man z. B. an Bartonschen Irisknöpfen wahrnimmt, ist ebenfalls durch Eingravirung feiner Linien hervorgerufen und beruht auf Beugung des Lichtes.

360. **Hof** nennt man den farbigen Lichtkranz, von welchem häufig die Sonnen- oder Mondscheibe umgeben erscheint, wenn der Himmel mit einem zarten Wolkenschleier überzogen ist. Blickt man durch eine mit Bärlappsamen bestreute Glasplatte nach einer Kerzenflamme, so sieht man diese inmitten eines hellen, rötlich gefärbten

---

[1]) Im prismatischen Spektrum sind die langwelligen Strahlen mehr zusammengedrängt, die kurzwelligen mehr auseinandergezogen als im Gitterspektrum.

Lichtscheines, welcher von mehreren mit den Regenbogenfarben geschmückten Ringen umgeben ist, die ihren violetten Rand nach innen, den roten nach aufsen kehren. Diese Erscheinung erklärt sich durch die beugende Wirkung, welche die Körnchen des Bärlappmehles auf die an ihnen vorübergehenden Lichtstrahlen ausüben. Dem Babinetschen Prinzip gemäfs bringt jedes dieser Körnchen als kreisrundes dunkles Schirmchen dieselbe Beugungserscheinung hervor, nämlich farbige Ringe (358), wie eine kreisförmige Öffnung von gleichem Durchmesser. Nimmt man zu dem Versuche ein feineres Pulver, z. B. den feinen Samenstaub des Eierpilzes (Bovist), so werden die Ringe weiter, und zwar steht ihr Durchmesser im umgekehrten Verhältnis zu dem der Kügelchen. Damit farbige Ringe sich ausbilden können, ist deshalb erforderlich, dafs alle Körnchen unter sich gleich seien; sind Körperchen von ungleicher Gröfse miteinander gemischt, so fallen Ringe verschiedener Farben aufeinander und vermischen sich zu einem weifslichen Schein. Ganz ebenso entstehen die Sonnen- und Mondhöfe durch Beugung des Lichts an den Wasserkügelchen des Wolkenschleiers. Aus den Durchmessern der Ringe, deren erster unter einem Winkel von 1 bis $4^0$ erscheint, kann man die Durchmesser der Nebelkügelchen bestimmen; man findet, dafs sie im Winter durchschnittlich gröfser sind als im Sommer. Bei herannahendem Regenwetter vergröfsern sich die Kügelchen schnell, und der Mondhof wird enger. Dafs man Mondhöfe häufiger beobachtet als Sonnenhöfe, hat seinen Grund darin, dafs das Licht der Sonne so blendend ist, dafs man die lichtschwachen Ringe daneben nicht zu sehen vermag; man sieht sie aber sofort, wenn man das viel weniger helle Spiegelbild der Sonne auf einer Wasserfläche oder auf einer Glasplatte betrachtet.

Steht man auf freier Bergspitze, von feinen, in der Nähe kaum sichtbaren Nebeln umgeben, die unverhüllte Sonne im Rücken und wogende Nebelschleier zu Füfsen, so sieht man sein Schattenbild in scheinbar riesiger Gröfse auf die Nebelwand gezeichnet und den Kopf desselben von farbigen Ringen umkränzt (Heiligenschein). Diese Ringe entstehen durch Beugung der Sonnenstrahlen an den Nebelkügelchen, welche dem Kopfe des Beobachters nahe sind, und durch Zurückwerfung der farbigen gebeugten Strahlen an den vor ihm befindlichen Dunstkörperchen. Die anscheinend riesenhafte Gröfse des Schattenbildes beruht auf einer unbewufsten Gesichtstäuschung. Da die Sonnenstrahlen unter sich nahezu parallel sind, kann der Schatten in der That nicht gröfser sein als der schattenwerfende Körper selbst. Obgleich er auf den Nebelschichten in gewöhnlicher Gröfse entsteht, versetzt ihn unser Urteil unwillkürlich in jene gröfsere Entfernung, in welcher der Nebel für unser Auge bestimmtere Umrisse gewinnt und als eine zum Auffangen eines Schattens geeignete Wand erscheint, und mufs ihm, da der Sehwinkel derselbe bleibt, eine abenteuerliche Gröfse zuschreiben. Nach dem Berg, auf dessen Gipfel der riesige Schatten zuerst wahrgenommen wurde, hat man ihn das Brockengespenst genannt.

361. **Farben dünner Blättchen**. Gieſst man ein wenig Terpentinöl auf Wasser, so breitet es sich zu einem dünnen, in prachtvollen Farben spielenden Häutchen aus; ähnliche Farben beobachtet man an alten, durch Verwitterung blind gewordenen Fensterscheiben, besonders schön aber an Seifenblasen. Sie zeigen sich überhaupt an dünnen, durchsichtigen Schichten jeder Art und werden daher „Farben dünner Blättchen“ genannt. Fällt ein Lichtbündel $AB$ (Fig. 381) auf eine dünne Schicht, so wird ein Teil desselben an der Oberfläche nach $BC$ zurückgeworfen; ein groſser Teil $BD$ aber dringt in das Blättchen ein, wird an der unteren Fläche nach $DE$ reflektirt, und tritt nach $EF$ parallel zu $BC$ aus. Die Strahlen $BC$ und $BDEF$ interferiren miteinander, wenn sie im Auge, oder auf einem Schirm, auf dem man mittels einer Linse das Bild des Blättchens entwirft, zusammentreffen. Die an der Hinterfläche zurückgeworfenen Strahlen haben nämlich bis zur Wellenebene $EG$, indem sie die Dicke des

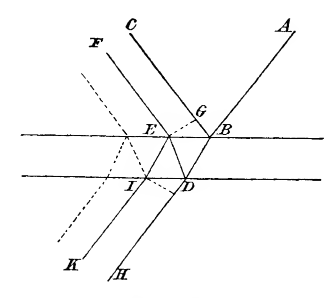
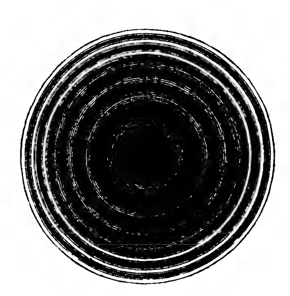


Fig. 381.
Farben dünner Blättchen.


Fig. 382.
Newtonsche Farbenringe.

Blättchens hin und zurück durchlaufen muſsten, gegenüber den an der Vorderfläche reflektirten eine um so gröſsere Verzögerung erlitten, je dicker das Blättchen ist. Sind nun die Umstände z. B. derart, daſs der Gangunterschied anderthalb Wellenlängen des grünen Lichts beträgt, so werden die längeren roten Wellen nur etwa um eine, die kürzeren violetten Wellen aber um nahezu zwei Wellenlängen verzögert. Die grünen Strahlen löschen sich daher gegenseitig aus, die roten und violetten aber nicht, und das Blättchen zeigt unserem Auge eine aus Rot und Violett gemischte Purpurfarbe. Je nach der Dicke des Blättchens werden immer andere Farben aus dem zurückgeworfenen Lichte getilgt und dadurch die mannigfaltigsten Farbenmischungen hervorgebracht. Ist daher die durchsichtige Schicht nicht überall gleich dick, so erscheint sie vielfarbig gestreift, indem alle Stellen gleicher Dicke auch gleiche Färbung zeigen und sog. isochromatische Kurven bilden. Bei einer Seifenblase z. B. sieht man ihre oberste dünnste Stelle von lebhaft gefärbten Ringen umgeben. Man kann nach Newton (1675) solche F a r b e n r i n g e (Fig. 382) dauernd hervorrufen, wenn man eine flache Konvexlinse auf eine

ebene Glasplatte legt und etwas anpreſst; man erhält so zwischen den beiden Gläsern eine dünne Luftschicht, welche vom Berührungspunkt nach auſsen an Dicke allmählich zunimmt, und um diesen Punkt herum die farbigen Ringe in regelmäſsiger Anordnung zeigt.

Da im Berührungspunkt die Dicke des Blättchens Null ist, so ist hier auch der von ihm herrührende Gangunterschied Null, und man sollte erwarten, daſs die daselbst an der Vorder- und Hinterfläche reflektirten Strahlen sich verstärken. Thatsächlich aber vernichten sie sich; denn der Mittelpunkt des Ringsystems erscheint schwarz. Von den beiden interferirenden Strahlen wird nämlich der eine aus Luft kommend an Glas, also an einem Mittel kleinerer Fortpflanzungsgeschwindigkeit, der andere aus Glas kommend an Luft, an dem Mittel grösserer Lichtgeschwindigkeit, reflektirt. Bei jener Zurückwerfung aber wird die Schwingungsrichtung umgekehrt, oder, was dasselbe heisst, der Strahl wird um eine halbe Wellenlänge verzögert, bei dieser dagegen nicht (vgl. 286 u. 296). Es kommt daher überall zu dem beim Durchlaufen des Blättchens entstandenen Gangunterschied noch eine halbe Wellenlänge hinzu, und es entstehen für jede homogene Lichtart dunkle Ringe, wo jener Gangunterschied für sich Null oder eine gerade Anzahl, helle Ringe dagegen, wo er eine ungerade Anzahl von halben Wellenlängen ausmacht.

Der in $D$ nach $E$ (Fig. 381) zurückgeworfene und hier abermals reflektirte Strahl tritt teilweise nach $IK$ aus, so dass $IK$ mit dem direkt durchgegangenen Strahl $DH$ zur Interferenz kommt. Es zeigen sich daher Farbenringe auch im durchgehenden Licht, welche jedoch viel blasser sind als im reflektirten, weil der Strahl $IK$ infolge der zwei auf seinem Wege durch das Blättchen bei $D$ und $E$ erlittenen Reflexionen weit schwächer ist als der ohne Reflexion durchgegangene Strahl $BDH$, und diesen sonach niemals vollständig auslöschen kann. Da beide Reflexionen in diesem Falle gleichartig sind, so entsteht durch sie entweder gar keine Verzögerung, oder eine solche von zwei halben, d. i. einer ganzen Wellenlänge; die Ringe im durchgehenden Licht sind also hell, wo die im reflektirten dunkel sind, und zeigen bei weiſser Beleuchtung zu letzteren komplementäre Farben.

Da der Strahl $EF$, weil er das Blättchen zweimal durchlaufen muſste, etwas schwächer ist als $BC$, so kann er allein diesen nicht vollkommen vernichten, sondern nur im Zusammenwirken mit den unzählig vielen Strahlen, welche nach wiederholten Reflexionen im Innern des Blättchens in derselben Richtung mit $EF$ austreten (in Fig. 381 punktirt angedeutet). Gerade infolge dieses Zusammenwirkens erscheinen im reflektirten homogenen Licht die dunkeln Ringe vollkommen schwarz (Poisson, 1823).

Dickere Blättchen zeigen keine Farben, weil bei gröſseren Gangunterschieden viele über das ganze Spektrum ausgeteilte einfache Strahlenarten durch Interferenz ausgelöscht und ebenso viele dazwischen liegende und daher ebenfalls über alle Farben verteilte Strahlenarten verstärkt werden, deren Gemisch dem Auge deshalb als Weiſs erscheinen muſs. Zerlegt man das von einem Glimmer- oder Glasblättchen reflektirte anscheinend weiſse Licht durch ein Prisma, so zeigen sich im Spektrum zahlreiche dunkle Streifen, entsprechend allen jenen Strahlengattungen, welche durch die Interferenz ausgetilgt worden sind.

362. **Stehende Lichtwellen.** Trifft ein paralleles Strahlenbündel (oder eine ebene Lichtwelle) senkrecht auf einen ebenen Spiegel, so entsteht durch Interferenz der einfallenden mit der zurückgeworfenen Welle eine stehende Wellenbewegung, derart, daſs in einem und demselben Abstand vom Spiegel, d. h. in einer zu ihm parallelen Ebene, überall der gleiche Schwingungszustand herrscht. Die Schwingungsbäuche und Schwingungsknoten bilden zwei Scharen

solcher zum Spiegel paralleler Ebenen, deren Abstände voneinander für dieselbe Schar je eine halbe Wellenlänge betragen, und durch die Ebenen der anderen Schar halbirt werden. Man denke sich nun dieses System stehender Wellen von einer gegen den Spiegel geneigten Ebene durchschnitten. Auf dieser müssen dann die beiden Scharen von Ebenen zwei Scharen von parallelen unter sich gleichweit abstehenden geraden Linien ausschneiden, welche abwechselnd den Schwingungsbäuchen und Schwingungsknoten entsprechen. Wäre die schneidende Ebene senkrecht zum Spiegel, so würden die Abstände dieser geraden Linien nur eine halbe Wellenlänge betragen und demnach so klein sein, dafs sie mit unbewaffnetem Auge nicht getrennt wahrgenommen werden könnten. Die Abstände der Linien auf der schneidenden Ebene werden aber um so gröfser, eine je geringere Neigung zum Spiegel man derselben gibt, und man kann die Neigung so klein wählen, dafs die Linien $^1/_2$ bis 2 mm weit auseinandertreten. Wiener (1890) erwies die Existenz solcher stehenden Lichtwellen auf photographischem Wege, indem er in der Lage einer solchen Ebene vor dem Spiegel ein sehr dünnes, durchsichtiges, lichtempfindliches Häutchen von Chlorsilber-Kollodium anbrachte. Längs der Geraden mit Schwingungsbäuchen mufs alsdann die stärkste, längs der mit Schwingungsknoten die geringste photographische Wirkung eintreten, und nach der Entwickelung zeigte sich in der That auf dem Häutchen ein System abwechselnd heller und dunkler Streifen, von welchen diese den Bäuchen, jene den Knoten entsprechen.

363. **Photographie der Farben.** Mit Hilfe stehender Lichtwellen gelang es Lippmann 1891, das Spektrum sowie andere farbige Objekte in ihren natürlichen Farben zu photographiren. Als lichtempfindliche Schicht dient ein dünnes, auf einer Glasplatte ausgebreitetes Häutchen aus Albumin, in welchem Jod- und Bromsilber äufserst fein und gleichmäfsig verteilt sind. Diese Platte bildet, das Häutchen nach innen, die Vorderwand eines mit Quecksilber gefüllten Glastroges; die auf ihr aufgenommene und wie gewöhnlich entwickelte und fixirte Photographie des Spektrums zeigt nun vor dunklem Hintergrund im reflektirten Licht die Spektralfarben, jede an ihrer Stelle, im durchgehenden Licht die komplementären Farben. Während des Photographirens bilden nämlich die einfallenden mit den an der Quecksilberfläche zurückgeworfenen Strahlen innerhalb der empfindlichen Schicht stehende Wellen, mit zur Oberfläche der Schicht parallelen Bauch- und Knotenebenen. In den letzteren wird gar keine photographische Wirkung stattfinden; in den ersteren dagegen werden die Silbersalze am stärksten zersetzt werden. Es werden sich daher schichtweise Ablagerungen von reflektirenden Silberteilchen bilden, und das Häutchen wird dadurch in eine Reihe sehr dünner Blättchen geteilt, deren Dicke für jede Farbe gleich dem Abstand zweier Bäuche, also gleich einer halben Wellenlänge der betreffenden Farbe ist. Fällt nun weifses Licht auf ein solches Blättchen, so findet zwischen dem an der Vorderfläche und dem an der Hinterfläche reflektirten Anteil Interferenz statt, vermöge des Gangunterschiedes, welcher gleich der doppelten Dicke des Blättchens ist. Aber nur für eine der im weifsen Lichte enthaltenen Farben ist dieser Gangunterschied eine ganze Wellenlängs, nämlich für diejenige, welche beim Photographiren auf diese Stelle der Platte gewirkt hat; indem die beiden Lichtanteile interferiren, wird nur diese Farbe verstärkt, während die übrigen sich mehr oder weniger schwächen. An jeder Stelle des Bildes haben also die Blättchen genau diejenige Dicke, welche notwendig ist, um durch Interferenz im reflektirten Licht die dorthin treffende Farbe wieder hervorzubringen. Die Farben, welche das Bild zeigt, sind also zunächst nichts anderes als Farben dünner Blättchen; sie erscheinen jedoch viel reiner und gesättigter als diese. Es hat dies seinen Grund darin, dafs innerhalb der empfindlichen Schicht wegen der Kleinheit der Lichtwellen eine gröfsere Zahl solcher dünner Blättchen übereinander gelagert sind. Je mehr reflektirende Flächen vorhanden sind, desto reiner wird die reflektirte Farbe. Denn diese zahlreichen, der Tiefe nach in gleichen Abständen aufeinanderfolgenden Flächen bilden ein Gitter, welches nur jeweils Strahlenbündel der zugehörigen Farbe, deren Gangunterschiede eine Anzahl ganzer Wellenlängen ausmachen, verstärkt, diejenigen von anderer Farbe aber vernichtet.

364. **Polarisation des Lichts.** Turmalinplatten, von welchen wir jetzt und in der Folge Gebrauch machen, werden aus Turmalin, einem in Gestalt einer sechsseitigen Säule krystallisirten Halbedelstein, parallel der Säulenachse geschnitten. Licht, welches durch eine solche Platte hindurchgegangen ist, zeigt dem bloſsen Auge keine andere Veränderung, als daſs es (durch Absorption) die braune oder olivengrüne Färbung, welche dem Krystall eigen ist, angenommen hat. Legt man nun auf die erste Turmalinplatte eine zweite und zwar zunächst so, daſs die Krystallachsen der beiden Platten zu einander parallel, z. B. beide von unten nach oben (Fig. 383 *A*), gerichtet sind, so geht das aus der ersten Platte tretende Licht auch durch die zweite, indem es nur wegen der gröſseren Dicke, die es jetzt zu durchlaufen hat, eine etwas tiefere Färbung annimmt. Dreht man aber die zweite Platte in ihrer Ebene, so wird das durch beide Platten gegangene Licht immer dunkler und verschwindet endlich ganz, wenn die Achsen der beiden Krystalle zu einander senkrecht stehen (Fig. 383 *B*); dreht man noch weiter, so erscheint das Licht allmählich wieder und erreicht die ursprüngliche Helligkeit, wenn die Krystallachsen wieder parallel stehen. Ein natürlicher, unmittelbar von einer Lichtquelle ausgehender Lichtstrahl würde von der zweiten Turmalinplatte in jeder ihrer Stellungen mit der gleichen Lichtstärke durchgelassen werden; der durch die erste Turmalinplatte gegangene Lichtstrahl verhält sich also nicht mehr wie natürliches Licht; denn er wird von der zweiten Platte nur dann ungeschwächt durchgelassen, wenn ihre Krystallachse parallel zur Achse der ersten Platte gerichtet ist; er wird dagegen nicht durchgelassen, wenn die Achse der zweiten Platte mit der Achse der ersten Platte sich rechtwinklig kreuzt. Während also ein natürlicher Lichtstrahl das gleiche Verhalten zeigt, welche der verschiedenen Fig. 384 *A* (in dieser Figur denke man sich den Lichtstrahl wie in der vorigen senkrecht aus der Ebene der Zeichnung gegen das Auge des Beobachters kommend) angedeuteten Stellungen man der Achse der Turmalinplatte, mit welcher man ihn prüft, auch geben mag, und sonach in allen zu seiner Fortpflanzung senkrechten Richtungen gleich beschaffen ist, ist bei dem durch eine erste Turmalinplatte gegangenen Lichtstrahl unter allen diesen Richtungen eine besonders ausgezeichnet (Fig. 384 *B*), indem der Lichtstrahl durch eine zweite Turmalinplatte durchgeht oder nicht durchgeht, je nachdem diese zweite Platte mit ihrer charakteristischen Richtung zu der entsprechenden der ersten Platte parallel oder senkrecht angeordnet ist. Einen derartigen Strahl, welcher nach verschiedenen Seiten hin sich verschieden verhält, nennt man mit einem nicht gerade glücklich gewählten Ausdruck „polarisirt“.

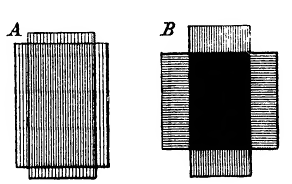


Fig. 383.
Turmalinplatten.

Von der Möglichkeit eines solchen Verhaltens kann man sich

nun vom Standpunkte der Wellenlehre leicht Rechenschaft geben. Bei einer Wellenbewegung können im allgemeinen die Schwingungen der einzelnen Teilchen des in Wellenbewegung befindlichen Stoffes sowohl in der Richtung, nach welcher die Welle fortschreitet, d. h. in der Richtung des Strahles, erfolgen (longitudinale oder Längsschwingungen), als auch senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung vor sich gehen (transversale oder Querschwingungen). Die erstere findet z. B. statt bei den Schallwellen in der Luft, welche nur durch Längsschwingungen fortgepflanzt werden. Querschwingungen dagegen beobachtet man z. B. an einem langen zwischen den Punkten *A* und *B* (Fig. 385) ausgespannten Seil, wenn man demselben etwa in lotrechter Richtung einen Schlag versetzt; man sieht alsdann am Seil entlang Wellen sich fortpflanzen, wobei jeder Punkt des Seils senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung auf- und abschwingt. Ein von *B* nach *A* in Richtung des Seiles blickender Beobachter würde die Schwingungen in einer lotrechten Richtung wie Fig. 384 *B* erfolgen sehen und an dem schwingenden Seil die obere und untere Seite, nach welchen die Schwingungen abwechselnd gerichtet sind, von der rechten und

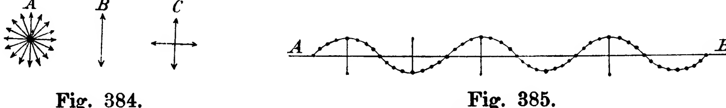



**Fig. 384.**
Querschnitte von Lichtstrahlen.

**Fig. 385.**
Polarisirter Lichtstrahl.

linken Seite, nach welchen hin keine Schwingungen vor sich gehen, wesentlich verschieden finden. Er würde sich ferner überzeugen können, dafs wenn man das Seil durch einen Schlitz hindurchgehen läfst, die lotrechten Schwingungen sich ungehindert fortpflanzen, sobald man den Schlitz lotrecht stellt, sich dagegen nicht durch den Schlitz fortpflanzen können, wenn man ihn wagrecht stellt. Da sich sonach der betrachtete Seilwellenstrahl *AB* nach verschiedenen Seiten verschieden verhält, ähnlich wie ein durch eine Turmalinplatte gegangener Lichtstrahl, so könnte man ihn ebensogut wie diesen „polarisirt“ nennen; und andererseits erkennt man, dafs das Verhalten eines polarisirten Lichtstrahles *AB* (Fig. 385) sich leicht erklärt durch die Annahme, dafs derselbe sich nur durch Querschwingungen fortpflanze, die sämtlich in einer und derselben durch den Strahl gelegten Ebene erfolgen. Diese Ebene, in Fig. 385 die Ebene der Zeichnung, heifst seine Schwingungsebene.

Da in der Turmalinplatte alles symmetrisch ist in Bezug auf die krystallographische Achse, so ist es einleuchtend, dafs die charakteristische Richtung, in der sich die Schwingungen des hindurchgegangenen Lichtes vollziehen, entweder jener Symmetrieachse parallel oder zu ihr senkrecht liegen mufs. An und für sich vermag der Versuch mit den beiden Turmalinplatten nicht zu entscheiden, welche von diesen beiden Richtungen die Schwingungsrichtung ist. Dagegen

gestattet der folgende einfache Versuch, wenigstens mit einiger Wahrscheinlichkeit, auf die Richtung der Schwingungen zu schliefsen. Dreht man eine Turmalinplatte *abcd* (Fig. 386), während man durch dieselbe in der Richtung *on* nach einer weifsen Fläche blickt, um eine zur Krystallachse parallele Umdrehungsachse *fg* in die Lage *a'b'c'd'*, so bleibt die Helligkeit des Gesichtsfeldes fast ungeändert. Neigt man aber die Platte derart gegen die Strahlenrichtung *no* (Fig. 387), dafs die zur Krystallachse senkrechte Linie *hi* die Umdrehungsachse bildet, so wird das Gesichtsfeld bedeutend dunkler.

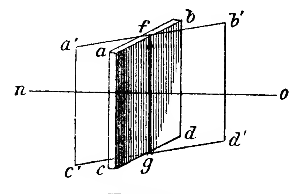



Fig. 386.

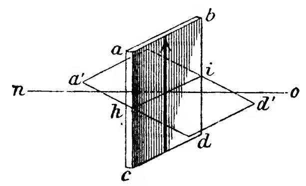



Fig. 387.

Versuch zur Ermittelung der Schwingungsrichtung.

Nun liegt es nahe, anzunehmen, dafs eine Änderung der Helligkeit nur dann eintreten kann, wenn der Winkel, den die Schwingungsrichtung mit der Krystallachse bildet, ein anderer wird. Nehmen wir an, dafs das austretende Licht seine Schwingungen senkrecht zur Krystallachse ausführe, so würden die Schwingungen sowohl bei der Drehung im ersten Falle, wie bei der Drehung im zweiten Falle ihre rechtwinklige Lage zur Achse behalten. Nehmen wir aber an, das Licht schwinge parallel zur Achse, so bleibt es der Achse parallel bei der ersten Drehung, während im zweiten Falle der Winkel zwischen der Schwingungsrichtung und der Achse mit zunehmender Drehung immer gröfser wird. Wir haben somit Grund (mit Fresnel) anzunehmen, dafs die Schwingungsebene des aus der Turmalinplatte austretenden polarisirten Strahles zur Krystallachse parallel sei, wie durch Fig. 388 noch besonders veranschaulicht wird.

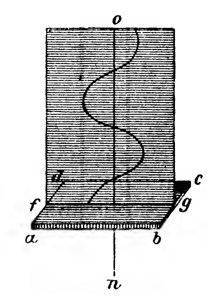



Fig. 388.
Lage der Schwingungsebene beim Turmalin.

Der Versuch mit den gekreuzten Turmalinplatten (Fig. 383 *B*) beweist, dafs in einem polarisirten Lichtstrahl nur Querschwingungen, aber keine Längsschwingungen enthalten sind. Wären nämlich letztere vorhanden, so müfsten sie, da die Beschaffenheit eines Strahles in Bezug auf Längsschwingungen notwendig ringsherum die nämliche ist, wie durch die erste, so auch durch die zweite Turmalinplatte hindurchgehen, welche Stellung man der letzteren auch geben mag, und es könnte niemals, wie es doch bei gekreuzter Stellung der Platten der Fall ist, völlige Dunkelheit eintreten. Aber auch ein natürlicher Lichtstrahl, wie er unmittelbar von einer Lichtquelle

geliefert wird, kann nur aus Querschwingungen bestehen; denn er läſst sich ohne Schwächung in zwei zu einander senkrecht polarisirte Strahlen zerlegen. Da ein natürlicher Lichtstrahl ringsherum die gleiche Beschaffenheit zeigt, so muſs man sich vorstellen, daſs gleichzeitig in seinen verschiedenen Teilen und rasch nacheinander an derselben Stelle die Schwingungen nach allen Seiten erfolgen, wie in Fig. 384 *A* angedeutet ist; welche gleichsam den Querschnitt eines senkrecht aus der Papierfläche gegen das Auge des Beschauers kommenden natürlichen Lichtstrahles darstellt, während Fig. 384 *B* in ähnlicher Weise den Querschnitt eines polarisirten Lichtstrahles versinnlicht. Die Richtigkeit dieser Anschauung wird durch folgenden Versuch bestätigt. Läſst man eine Turmalinplatte rasch in ihrer Ebene (um die Strahlenrichtung *no*, Fig. 388, als Achse) sich drehen, so verhält sich das aus der Platte austretende Licht, dessen Schwingungen jetzt innerhalb sehr kurzer Zeit nach allen möglichen zum Strahl senkrechten Richtungen vor sich gehen, ganz wie natürliches Licht. Nehmen wir im Querschnitt eines natürlichen Lichtstrahles zwei beliebige zu einander senkrechte Richtungen an (Fig. 384 *C*), so läſst sich jede Schwingung den Regeln der Mechanik gemäſs nach diesen beiden Richtungen in zwei Teilschwingungen (Komponenten) zerlegen (20); durch Zusammenfassung aller in dieselbe Richtung fallenden Komponenten kann daher die Bewegung in einem natürlichen Lichtstrahl auf zwei gleiche, zu einander senkrechte Schwingungen zurückgeführt werden, oder, mit anderen Worten, ein natürlicher Lichtstrahl darf angesehen werden als zusammengesetzt aus zwei zu einander senkrecht polarisirten voneinander unabhängigen Strahlen von gleicher Lichtstärke. Auch diese Anschauung wird durch den Versuch gerechtfertigt, denn zwei zu einander senkrecht polarisirte gleichhelle Strahlen geben, miteinander vereinigt, in der That einen Lichtstrahl, der sich wie ein natürlicher verhält, indem die Seitlichkeit des einen durch die entgegengesetzte des anderen vollkommen aufgehoben wird.

Betrachtet man das von einer ebenen Glasplatte oder irgend einer anderen nichtmetallischen Oberfläche zurückgeworfene Licht durch eine Turmalinplatte, so erscheint dasselbe, wenn man die Turmalinplatte in ihrer Ebene um den zurückgeworfenen Strahl als Achse dreht, bald heller, bald dunkler, verschwindet jedoch (im allgemeinen) bei keiner Stellung der Turmalinplatte vollständig. Am hellsten erscheint es, wenn die Krystallachse des Turmalins zur Zurückwerfungsebene oder Einfallsebene senkrecht steht, am dunkelsten, wenn sie in diese Ebene zu liegen kommt. Das von der Glasplatte zurückgeworfene Licht ist sonach weder natürliches, noch ist es vollständig polarisirt, sondern verhält sich so, als ob es aus natürlichem und aus polarisirtem Lichte, dessen Schwingungen zur Reflexionsebene senkrecht stehen, gemischt wäre; man bezeichnet es daher als t e i l w e i s e  p o l a r i s i r t. Das Verhältnis des polarisirten Anteils zum nichtpolarisirten ändert sich mit dem Einfallswinkel. Bei senk-

rechtem Einfallen z. B. enthält das zurückgeworfene Strahlenbündel gar kein polarisirtes Licht; beträgt aber der Einfallswinkel 57°, oder bildet der einfallende Strahl (*ab*, Fig. 389) einen Winkel *abh* von 33° mit der Glasplatte, so fehlt der unpolarisirte Anteil ganz. Bei diesem Einfallswinkel, welcher der Polarisationswinkel genannt wird, ist also das von der Glasplatte zurückgeworfene Licht (*bc*) vollständig polarisirt, und zwar erfolgen seine Schwingungen senkrecht zur Polarisationsebene, wie die Zurückwerfungsebene *abc* in diesem Fall auch genannt wird. Diese Lage der Schwingungsebene (*dfim*) wird durch Fig. 389 versinnlicht. Statt das von der Glasplatte zurückgeworfene Licht mittels einer Turmalinplatte zu untersuchen, kann man es auch unter demselben Winkel auf einer zweiten Glasplatte auffangen (Fig. 390); stehen die beiden Platten, wie in der Figur, zu einander parallel, so fallen ihre Reflexionsebenen zusammen, und der an der ersten Platte polarisirte Strahl *bc*, dessen Schwingungen zur gemeinschaftlichen Reflexionsebene senkrecht sind, wird an der zweiten Platte nach *cd* zurückgeworfen. Dreht man aber die zweite Platte, während sie mit dem Strahl *bc* stets den Winkel 33° bildet, aus dieser Stellung heraus, so wird das von ihr zurückgeworfene Licht immer schwächer und verschwindet endlich ganz, wenn die beiden Reflexionsebenen senkrecht aufeinander stehen, weil bei dieser gekreuzten Stellung die Schwingungen des Strahles *bc* in die Reflexionsebene der zweiten Platte zu liegen kommen, die Platte aber unter diesem Einfallswinkel nur solche Schwingungen zurückzuwerfen vermag, welche zu ihrer Reflexionsebene senkrecht erfolgen.

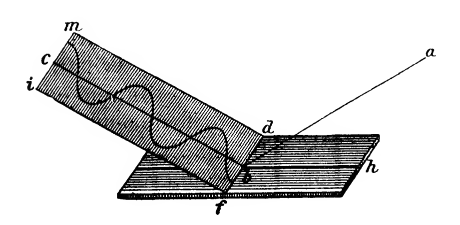


Fig. 389.
Polarisation durch Reflexion.

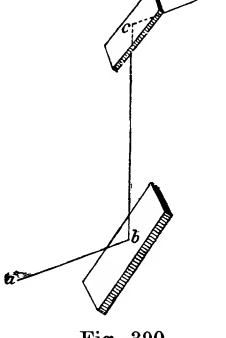


Fig. 390.
Polarisationsspiegel.

Zu diesem Versuch werden die Platten gewöhnlich auf der Rückseite geschwärzt, oder sie sind aus schwarzem Glas verfertigt, um das sonst durch sie hindurchgehende unpolarisirte fremde Licht auszuschliefsen.

Auch das von einer Glasplatte unter schiefem Winkel durchgelassene Licht erweist sich, mit einer Turmalinplatte untersucht, als teilweise polarisirt, und zwar liegen die Schwingungen des polarisirten Anteils in der Einfallsebene, oder das durchgelassene Licht ist senkrecht polarisirt zum zurückgeworfenen. Diese Thatsache ist

die notwendige Ergänzung zur Polarisation des reflektirten Lichtes. Beide Lichtbündel, das reflektirte und das gebrochene, müssen sich zusammen zu dem natürlichen einfallenden Lichte ergänzen. Daher sind auch, wie Arago gezeigt hat, bei jedem Einfallswinkel, die zu einander senkrecht polarisirten Lichtmengen im zurückgeworfenen und gebrochenen Strahl einander gleich. Um die Verhältnisse etwas deutlicher zu übersehen, denken wir uns die Schwingungen des natürlichen einfallenden Lichtes in jedem Augenblicke in zwei Teilschwingungen zerlegt, von denen die eine in der Einfallsebene, die andere senkrecht dazu erfolgt. Dafs dies gestattet ist, und dafs dabei die beiden Teilschwingungen gleich stark, aber voneinander ganz unabhängig sein müssen, haben wir oben schon gesehen. Bei dem Auftreffen auf die Glasoberfläche teilt sich jeder der beiden Teilstrahlen in einen zurückgeworfenen und einen gebrochenen Anteil, deren Stärken zusammen gleich der Stärke des einfallenden Strahles sind. Dabei ist für diejenige Schwingung, die sich in der Einfallsebene vollzieht, der reflektirte Anteil immer kleiner, als für den senkrecht zur Einfallsebene schwingenden Strahl; unter dem Polarisationswinkel wird nur der letztere reflektirt. Im gebrochenen Licht aber ist der in der Einfallsebene schwingende Strahl stets stärker als der senkrecht zur Einfallsebene schwingende. Unter dem Polarisationswinkel geht der erstere ganz in das Glas über, da nichts von ihm reflektirt wird, der zweite aber nur teilweise. Daher ist der hindurchgehende Strahl unter allen Einfallswinkeln stets nur teilweise, niemals vollständig polarisirt. Gleichwohl läfst sich eine nahezu vollständige Polarisation der durchgegangenen Strahlen erzielen, wenn man statt einer einzigen Glasplatte eine Schicht von hinlänglich vielen Platten oder eine sogenannte Glassäule anwendet. Fällt nämlich auf eine solche Plattenschicht unter dem Polarisationswinkel ein natürlicher Lichtstrahl, so geht der in der Einfallsebene schwingende Teilstrahl, weil er gar nicht zurückgeworfen wird, durch sämtliche Platten ohne Verlust hindurch; der senkrecht zur Einfallsebene schwingende Teilstrahl dagegen erleidet an jeder Fläche eine teilweise Zurückwerfung und wird dadurch bis zur Unmerklichkeit geschwächt. Die Glassäule läfst daher unter dem Polarisationswinkel nur solche Strahlen durch, deren Schwingungen parallel zur Einfallsebene vor sich gehen.

Der Polarisationswinkel ist für verschiedene Stoffe verschieden; er wächst mit dem Brechungsverhältnis, wie schon Malus, der Entdecker der Polarisation durch Spiegelung (1810), erkannt hatte, und beträgt z. B. für Wasser 53°, für Schwefelkohlenstoff 59°, für Flintglas 60° etc. Die gesetzmäfsige Beziehung zwischen Polarisationswinkel und Brechungsverhältnis wurde aber erst 1815 von Brewster aufgedeckt, welcher zeigte, dafs der Polarisationswinkel derjenige Einfallswinkel ist, für den der zurückgeworfene Strahl (*bc* Fig. 291) mit dem gebrochenen (*bd*) einen rechten Winkel bildet. Da hiernach zum Polarisationswinkel $p$ der Winkel $90° - p$ als Brechungswinkel gehört,

so ergibt sich vermöge des Brechungsgesetzes $\sin p \,/\, \sin(90^{0}-p) = \sin p \,/\, \cos p = n$ oder $tg\,p = n$ als Ausdruck des Brewsterschen Gesetzes. Weiſses Licht kann daher, weil für jede homogene Farbe der Brechungsindex $n$ und deshalb auch der Polarisationswinkel ein anderer ist, durch Reflexion niemals vollständig polarisirt werden.

365. **Doppelbrechung.** Alle nicht zum regelmäſsigen Krystallsystem gehörigen krystallisirten Körper besitzen die Eigenschaft, einen in sie eindringenden Lichtstrahl (*ab*) im allgemeinen in zwei Strahlen (*bc* und *bd*) zu trennen (Fig. 392). Durch die Spaltbarkeit der Krystalle nach bestimmten Richtungen verrät sich eine Regelmäſsigkeit ihres inneren Gefüges, welche sich aus der gesetzmäſsigen Anordnung und gleichheitlichen Orientirung ihrer Moleküle erklärt. Jedes Molekül ist aus Atomen von bestimmter Anzahl und Beschaffenheit aufgebaut, welche man sich um drei zu einander senkrechte Achsen nach bestimmter Regel geordnet denken kann. Im allgemeinen sind

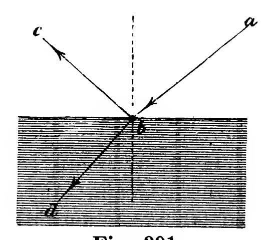



**Fig. 391.**
**Polarisationswinkel (Brewstersches Gesetz).**

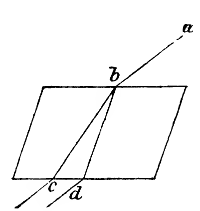



**Fig. 392.**
**Doppelbrechung.**

diese drei Achsen voneinander verschieden, so daſs Kräfte, welche in den Richtungen dieser Achsen auf das Molekül einwirken, verschiedenen Widerständen begegnen. Eine groſse Anzahl gleicher Moleküle bilden einen Krystall, wenn sie so zusammentreten, daſs ihre gleichwertigen Achsen zu einander parallel zu liegen kommen. Die Folge davon ist, daſs auch der Krystall als Ganzes nach verschiedenen Richtungen verschiedene physikalische Eigenschaften zeigt, z. B. die Wärme je nach der Richtung ungleich schnell fortpflanzt, sich bei der Erwärmung nach verschiedenen Richtungen ungleich ausdehnt etc. Lagern sich aber die Moleküle regellos durcheinander, so daſs die gleichwertigen Molekülachsen nach allen möglichen Richtungen orientirt sind, so bilden sie einen unkrystallisirten oder amorphen Körper. Eine solche Regellosigkeit der Orientirung findet auch bei den flüssigen Körpern statt. Da in diesem Falle keine Richtung vor den anderen sich auszeichnet, so besitzen unkrystallisirte feste Körper und Flüssigkeiten nach allen Richtungen die gleichen physikalischen Eigenschaften. Dies findet übrigens auch statt bei den Krystallen des regelmäſsigen Systems, deren Moleküle drei gleichwertige Achsen haben. — Alle diese Körper, welche nach allen Richtungen mit gleichen Eigenschaften begabt sind, nennt man iso-

trop. Die Krystalle des quadratischen und hexagonalen Systems sind durch eine Symmetrieachse ausgezeichnet, während die zu dieser senkrechten Achsen von ihr verschieden, aber unter sich gleichwertig sind. Die Krystalle des rhombischen, monoklinen und triklinen Systems dagegen besitzen drei ungleichwertige Achsen (vgl. 54). Körper, welche, wie die Krystalle dieser fünf letzten Systeme, nach verschiedenen Richtungen verschiedene Eigenschaften zeigen, heifsen anisotrop oder heterotrop.

Eine Lichtwelle kann sich durch den Äther, welcher die Zwischenräume der Moleküle eines Körpers erfüllt, nicht fortpflanzen, ohne auf die Moleküle einzuwirken und wiederum von ihnen eine entsprechende Einwirkung zu erfahren. Diese Einwirkung gibt sich einerseits durch eine Schwächung der Welle (Absorption), andererseits durch eine Änderung ihrer Fortpflanzungsgeschwindigkeit kund. In einem isotropen Körper, welcher nach allen Richtungen sich gleich verhält, werden die Lichtschwingungen, welche Richtung sie auch haben mögen, immer in gleicher Weise beeinflufst. Werden in einem Punkte eines solchen Körpers (z. B. Glas) beliebig gerichtete Schwingungen erregt, so pflanzen sich dieselben zwar mit einer geringeren Geschwindigkeit fort als im freien Äther, aber nach allen Seiten mit der gleichen Geschwindigkeit und erzeugen rings um jenen Punkt kugelförmige Wellen. Man sagt daher, dafs die Wellenfläche der isotropen Mittel eine Kugel sei. Durch diese Gestalt der Wellenfläche ist die Fortpflanzungsweise des Lichts in solchen Mitteln erschöpfend gekennzeichnet; man lernt die Lichtbewegung für die anisotropen Körper ebenso vollständig kennen, wenn man ihre Wellenfläche ermittelt, d. i. die Fläche, auf welcher alle Teilchen sich gleichzeitig in gleichem Schwingungszustand (in gleicher Phase) befinden.

Als Beispiel eines solchen Körpers diene der Kalkspat, welcher die Eigenschaft der Doppelbrechung in besonders hervorragendem Grade besitzt (Erasmus Bartholinus, 1669). Seine durchsichtigen farblosen Krystalle sind nach drei Richtungen sehr vollkommen spaltbar; es ist daher leicht, Stücke aus ihnen zu spalten, welche von sechs gleichen rautenförmigen Flächen begrenzt sind und deshalb Rautenflächner (Rhomboëder, Fig. 393) genannt werden. Zwei gegenüberliegende Ecken $a$ und $b$ sind von drei stumpfen Kantenwinkeln gebildet, die übrigen sechs von einem stumpfen und zwei spitzen. Die gerade Linie $ab$, welche die zwei stumpfen Ecken miteinander verbindet, heifst die Hauptachse oder auch blofs die Achse des Krystalls; rings um sie sind die Flächen, Kanten und Ecken symmetrisch geordnet. Eine jede durch die Achse oder eine zu ihr parallele Linie gelegte Ebene wird Hauptschnitt genannt. Nun stelle in Fig. 394 die Ebene der Zeichnung einen Hauptschnitt eines Kalkspatkrystalls vor und $ab$ die Achsenrichtung. In dem Punkt $m$ mögen Schwingungen erregt werden, welche teils in der Ebene des Hauptschnitts erfolgen, teils zu ihr senkrecht stehen;

die letzteren, welche auch zur Achse senkrecht sind, pflanzen sich nach allen Seiten mit der nämlichen Geschwindigkeit fort und erzeugen die in der Figur angedeutete kreisförmige Welle. Die in der Ebene des Hauptschnitts liegenden Schwingungen aber pflanzen sich mit verschiedenen Geschwindigkeiten fort, je nach dem Winkel, den sie mit der Achse bilden. Schwingungen z. B., welche nach *ab* parallel der Achsenrichtung selbst erfolgen, geben Anlafs zu einem Strahl *md*, der in der nämlichen Zeit, in welcher die zur Achse senkrechten Schwingungen den Halbmesser jener Kreiswelle durchlaufen, eine gröfsere Strecke *md* zurücklegt, weil im Kalkspat die zur Achse parallelen Schwingungen sich schneller fortpflanzen (s. u.) als die zur Achse senkrechten. Schwingungen dagegen, die nach *cd* gerichtet sind, erzeugen, weil sie senkrecht zur Achse stehen, einen

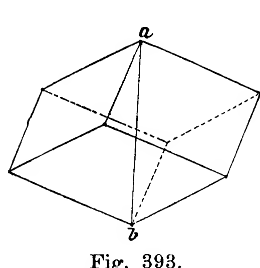



Fig. 393.
Rhomboëder.

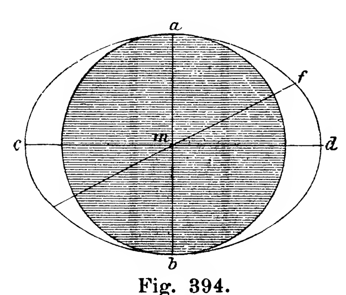



Fig. 394.
Ausbreitung des Lichts im Kalkspat.

Strahl *ma*, welcher in der gedachten Zeit nur bis zu jenem Kreis vordringt. Solchen Strahlen endlich, deren Schwingungen einen schiefen Winkel mit der Achse bilden, wird eine Fortpflanzungsgeschwindigkeit (z. B. *mf*) zukommen, die kleiner ist als *md*, aber gröfser als *ma*. Die im Hauptschnitt gelegenen Schwingungen erzeugen nämlich, wie Huygens (1678) gezeigt hat, eine Welle von elliptischem Umrifs *acbd*, welche die Kreiswelle, die den zum Hauptschnitt senkrechten Schwingungen entspricht, an den Achsenendpunkten *a* und *b* berührt. Da für alle Hauptschnitte das nämliche gilt, so braucht man nur die Fig. 394 um die Achse *ab* gedreht zu denken, um die Wellenfläche zu erhalten, welche für die allseitige Fortpflanzung des Lichts im Kalkspat mafsgebend ist. Diese Wellenfläche besteht aus zwei Schalen, einer Kugel für die zur Achse senkrechten Schwingungen und einem abgeplatteten Rotationsellipsoid, welches die Kugel umschliefst und sie an den Endpunkten der Achse berührt, für die zur Achse nicht senkrechten Schwingungen. Fig. 395 zeigt drei zu einander rechtwinklige Durchschnitte, nämlich zwei Hauptschnitte und einen zur Achse senkrechten Schnitt, zu einem leicht verständlichen Modell der Wellenfläche zusammengefügt.

Nun werde die Oberfläche *MN* (Fig. 396) eines Kalkspatkrystalls von einem Bündel paralleler Lichtstrahlen *abef* getroffen; zieht man

von *b* aus, wo die Oberfläche von der Lichtbewegung zuerst erreicht wird, eine Senkrechte, *bg*, zur Strahlenrichtung, so stellt dieselbe das zu dem Lichtbündel gehörige ebene Wellenstückchen vor, in welchem sich sämtliche Ätherteilchen gleichzeitig im nämlichen Schwingungszustand befinden (vgl. Fig. 375). Indem die Welle *bg* gegen die Krystalloberfläche fortschreitet, werden die zwischen *b* und *f* liegenden Ätherteilchen der Reihe nach von der Bewegung ergriffen, und jedes entsendet eine Wellenbewegung in den Krystall hinein. Der Einfachheit wegen werde angenommen, dafs die Einfallsebene, d. h. die Ebene der Zeichnung, zugleich ein Hauptschnitt des Krystalls sei. Alsdann haben wir uns jeden einfallenden natürlichen Lichtstrahl aus zwei gleich hellen Strahlen bestehend zu denken, von welchen der eine im Hauptschnitt, der andere senkrecht dazu schwingt. Letztere

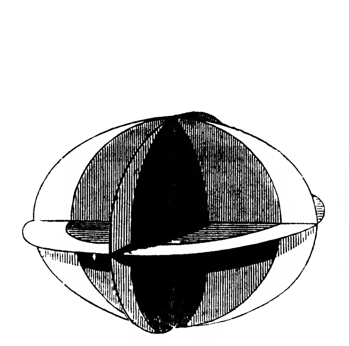


Fig. 395.
**Modell der Wellenfläche der einachsigen Krystalle.**

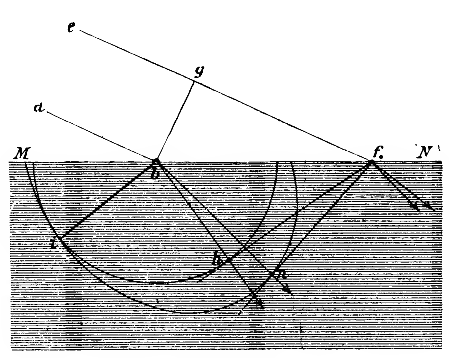



Fig. 396.
**Doppelbrechung im Kalkspat.**

Schwingungen, welche senkrecht zur Krystallachse *bi* erfolgen, werden sich, während die Welle *bg* von *g* bis *f* fortschreitet, im Krystall von *b* aus zu einer kreisförmigen Welle *ih* ausgebreitet haben, deren Halbmesser *bh* sich zu *gf* verhält wie die Fortpflanzungsgeschwindigkeit dieser Art Schwingungen im Krystall zur Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts in der Luft. Von jedem zwischen *b* und *f* gelegenen Punkte der Krystallfläche wird gleichzeitig eine Kreiswelle ausgegangen sein, deren Halbmesser jedoch um so kleiner ist, je später der zugehörige Punkt von der einfallenden Welle erfafst wird. Alle diese Kreiswellen sind in dem Augenblick, in welchem der Punkt *f* von der einfallenden Welle erreicht wird, bis zur Linie *fh* vorgedrungen, welche die gemeinsame Berührungslinie sämtlicher Kreiswellen ist. Die Linie *fh* stellt demnach die ebene Welle vor, welche sich in den Krystall hinein fortpflanzt, und die von *b* nach dem Berührungspunkt *h* gezogene Gerade *bh* gibt die zugehörige Richtung der gebrochenen Strahlen an. Da die bei dieser Zeichnung in Anwendung gekommene Wellenschale, wie bei den einfach brechenden (isotropen) Mitteln, kugelförmig ist, so befolgt ein

Strahl, der senkrecht zum Hauptschnitt schwingt, das gewöhnliche Snelliussche Brechungsgesetz. Will man sich in ähnlicher Weise von der Brechung der im Hauptschnitt schwingenden Strahlen Rechenschaft geben, so hat man, wenn *bi* die Richtung der Achse ist, um *b* den Umriſs *ni* der elliptischen Wellenschale und von *f* aus die Berührungslinie *fn* an denselben zu ziehen; diese Linie gibt alsdann die Lage der gebrochenen Welle und die von *b* aus nach dem Berührungspunkt *n* gezogene Gerade die zugehörige Strahlenrichtung an. Dieser Strahl befolgt nicht das gewöhnliche, sondern infolge der ellipsoidischen Gestalt seiner Wellenfläche ein viel verwickelteres Brechungsgesetz. Man sieht also, daſs ein auf einen Kalkspatkrystall treffender natürlicher Lichtstrahl (*ab*) im allgemeinen in zwei mit ungleicher Geschwindigkeit sich fortpflanzende Strahlen zerlegt wird: einen gewöhnlich gebrochenen oder ordinären (*bh*) und einen auſsergewöhnlich gebrochenen oder extraordinären Strahl (*bn*); beide sind vollständig polarisirt, und zwar schwingt dieser im Hauptschnitt, jener aber senkrecht zum Hauptschnitt. Steht die Einfallsebene senkrecht zur Achse, so schneidet sie die Wellenfläche in zwei koncentrischen Kreisen (vgl. Fig. 395) und beide Strahlen befolgen das Snelliussche Brechungsgesetz. Dies findet statt bei der Brechung durch ein Kalkspatprisma, dessen brechende Kante zur Krystallachse parallel ist. Man kann daher mittels eines solchen Prismas die beiden Hauptbrechungskoëfficienten $n_\omega$ für den ordinären und $n_\varepsilon$ für den extraordinären Strahl nach der Methode der kleinsten Ablenkung (329) bestimmen; man findet für Natriumlicht $n_\omega = 1,6585$, $n_\varepsilon = 1,4865$, und daraus, wenn die Geschwindigkeit des Lichts in der Luft $= 1$ gesetzt wird, die kleinste Fortpflanzungsgeschwindigkeit im Kalkspat $= 1/n_\omega = 0,6030$ (kleine Halbachse *ma* der Ellipse Fig. 393) und die gröſste $1/n_\varepsilon = 0,6727$ (groſse Halbachse *md*).

Da in der Richtung der Achse nur eine einzige Fortpflanzungsgeschwindigkeit stattfindet, so erleidet ein längs der Achse in den Krystall eindringender natürlicher Lichtstrahl keine Zerlegung. Jede solche Richtung in einem doppelbrechenden Krystall, längs welcher keine Doppelbrechung erfolgt, heiſst eine optische Achse. Alle Krystalle des quadratischen und hexagonalen Systems (zu welch letzterem der Kalkspat gehört) besitzen nur eine einzige optische Achse, welche mit ihrer krystallographischen Hauptachse zusammenfällt, und heiſsen daher optisch-einachsig. Solche Krystalle, bei welchen sich die auſsergewöhnlichen Strahlen schneller fortpflanzen als die gewöhnlichen, bei welchen also die ellipsoidische Wellenschale die Kugelwelle umschlieſst, wie Kalkspat, Turmalin, salpetersaures Natrium etc., heiſsen einachsig-negativ, weil man von dem Brechungsexponenten des ordinären Strahles etwas abziehen muſs, um den des extraordinären Strahles zu erhalten. Wird dagegen das Ellipsoid von der Kugelwelle umschlossen, oder besitzen die gewöhnlichen Strahlen die gröſsere Fortpflanzungsgeschwindigkeit, so heiſsen die Krystalle einachsig-positiv, wie z. B. Bergkrystall

oder Quarz, Zirkon, Zinnstein, Eis etc.; dem Brechungsexponenten des ordinären Strahles mufs etwas hinzugefügt werden, um denjenigen des extraordinären Strahles zu erhalten. Auch in den Krystallen der drei übrigen Systeme pflanzen sich zwei zu einander senkrecht polarisirte Strahlen mit ungleicher Geschwindigkeit fort, wovon jedoch keiner im allgemeinen das gewöhnliche Brechungsgesetz befolgt. Man findet in jedem dieser Krystalle zwei Richtungen ohne Doppelbrechung oder zwei optische Achsen und nennt sie daher optisch-zweiachsig. Dahin gehören z. B. Aragonit, Topas, Gips, Salpeter, Zucker u. a.

Die Doppelbrechung, indem sie jedes natürliche Lichtbündel in zwei zu einander senkrecht polarisirte zerlegt, bietet ein vortreffliches Mittel zur Herstellung polarisirten Lichts, wenn man nur dafür Sorge trägt, dafs das eine der beiden durch Doppelbrechung entstandenen Lichtbündel beseitigt werde, weil es sonst, mit dem anderen sich vermischend, wieder unpolarisirtes Licht geben würde. Dies geschieht in sehr sinnreicher Weise durch das Nicolsche (1829) Prisma (Fig. 397); dasselbe wird verfertigt aus einer durch Spaltung erhaltenen Kalkspatsäule, an welche man statt der natürlichen Endflächen, die mit den stumpfen Seitenkanten *PH* einen Winkel von 71° bilden, neue Flächen *PP* anschleift, deren Winkel mit diesen Kanten 68° beträgt. Nun wird das Prisma durch einen zu den neuen Endflächen senkrechten Schnitt *HH* entzweigesägt und die Schnittflächen, nachdem sie polirt sind, mittels Kanadabalsams wieder zusammengekittet. Trifft nun ein natürlicher Lichtstrahl *ab* auf die Vorderfläche *PP*, so spaltet er sich in einen gewöhnlich gebrochenen Strahl *bc* und einen ungewöhnlich gebrochenen *bd*. Der erstere, dessen Brechungsverhältnis (1,658) gröfser ist als dasjenige des Kanadabalsams (1,53), trifft so schief auf die Kittfläche, dafs er nicht in sie einzudringen vermag, sondern an ihr eine vollständige Zurückwerfung nach seitwärts erfährt. Der aufsergewöhnliche Strahl dagegen, welcher sich im Kalkspat rascher fortpflanzt als im Kanadabalsam, durchdringt letzteren und verläfst die Hinterfläche als vollkommen polarisirter

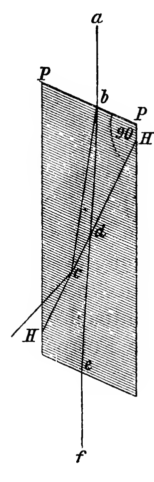



Fig. 397.

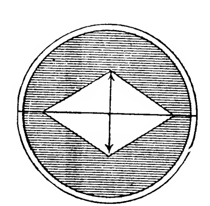


Fig. 398.

Nicolsches Prisma.

Strahl *def*, dessen Schwingungen parallel zum Hauptschnitt *PHP* oder parallel zur Ebene der kürzeren Diagonalen der rautenförmigen Endflächen erfolgen, wie in Fig. 398 angedeutet ist. Für Strahlen, welche senkrecht zu seinem Hauptschnitt schwingen, erscheint das Nicolsche Prisma vollkommen undurchsichtig.

Auch die polarisirende Eigenschaft des Turmalins steht mit seiner Doppelbrechung im Zusammenhang. Wie oben bereits angedeutet worden, ist in doppelbrechenden Krystallen nicht nur die Fortpflanzungsgeschwindigkeit, sondern auch die Absorption der Schwingungen abhängig von dem Winkel, welchen diese mit der optischen Achse bilden, so daſs die zur Achse senkrecht schwingenden Strahlen eine andere Absorption erleiden und daher anders gefärbt erscheinen als die parallel zur Achse schwingenden. Man nennt diese Eigenschaft Zweifarbigkeit oder Dichroismus; sie tritt bei manchen Krystallen so auffallend hervor, daſs man sie ohne weitere Hilfsmittel beim bloſsen Anblick des Krystalls wahrnimmt; der Pennin z. B. erscheint, in der Richtung seiner Achse betrachtet, dunkel blaugrün, senkrecht dazu braun, der Cordierit (Dichroit) in der Richtung der Achse dunkelblau, senkrecht zu ihr dagegen gelblichgrau. Der Turmalin ist nun ebenfalls ein „dichroitischer" Krystall, in welchem die zur Achse senkrechten Schwingungen des gewöhnlichen Strahles durch Absorption fast vollständig ausgelöscht und nur die zur Achse parallelen des auſsergewöhnlichen Strahles durchgelassen werden.

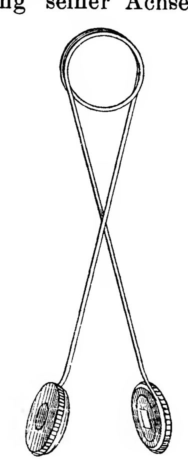


Fig. 399.
Turmalinzange.

366. **Polarisationsapparate** dienen dazu, durchsichtige Gegenstände im polarisirten Licht zu untersuchen. Da jede Vorrichtung zur Polarisirung des Lichts auch umgekehrt dazu dienen kann, polarisirtes Licht als solches zu erkennen, so bildet jede zweckmäſsige Zusammenstellung zweier polarisirender Vorrichtungen, von denen die erste als Polarisator das polarisirte Licht liefert, die zweite als Polariskop oder Analysator (Zerleger) dasselbe zu untersuchen gestattet, einen Polarisationsapparat. Der einfachste aller Polarisationsapparate ist wohl die Turmalinzange (Marx, 1827; Fig. 399); zwei Turmalinplatten sind mittels Korkscheiben drehbar in Drahtringe gefaſst; durch einen mehrfach gebogenen federnden Draht werden sie sanft gegeneinander gedrückt, so daſs ein zwischen sie gelegter Gegenstand wie von einer Zange festgehalten wird.

Bei Nörrembergs Polarisationsapparat (Fig. 400) dient eine durchsichtige Spiegelglasplatte *AB*, welche mit der Achse *Sc* des Instruments einen Winkel von 33° bildet, als Polarisator. Das in der Richtung *ab* einfallende etwa vom bewölkten Himmel kommende Licht wird zunächst nach unten (*bc*) gelenkt und von dort durch

einen im Fufsgestell eingelassenen belegten Spiegel *c* wieder nach aufwärts zurückgeworfen, so dafs es, nachdem es die Glasplatte *AB* durchdrungen hat, zu dem als Polariskop dienenden schwarzen Spiegel *S* gelangen kann, welcher mittels zweier Säulchen auf einem Ring steht, der innerhalb eines festen, in Grade geteilten Ringes drehbar ist. Die zu untersuchenden Gegenstände werden auf das Glastischchen bei *A* gelegt. Als Polariskop kann auch eine Glassäule oder ein Nicolsches Prisma verwendet werden. Will man diesen Apparat, welcher sich in der beschriebenen Ausstattung vorzugsweise zur Beobachtung mit parallelen Lichtstrahlen eignet, für konvergirendes Licht geschickt machen, so mufs man vor und hinter dem Gegenstand noch passende Linsen einschalten. Man hat jedoch zu diesem

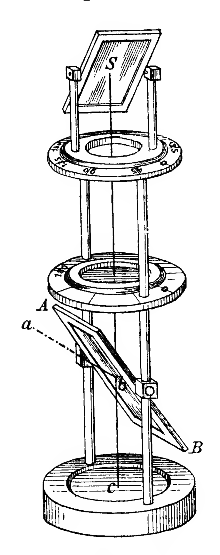



**Fig. 400.**
Nörrembergs Polarisationsapparat.

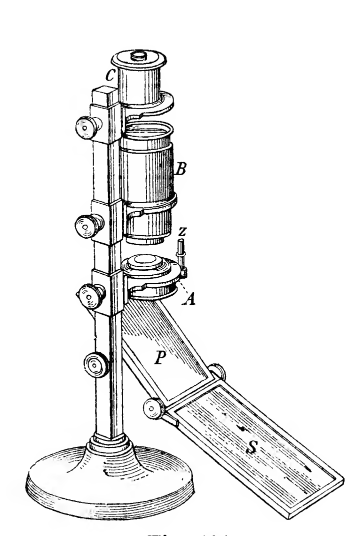



**Fig. 401.**
Nörrembergs mikroskopischer Polarisationsapparat.

Zweck auch eigene Instrumente hergestellt, welche man, weil sie Gegenstände von sehr geringer Ausdehnung zu untersuchen gestatten, auch wohl mikroskopische Polarisationsapparate nennt. Nörrembergs mikroskopischer Polarisationsapparat (Fig. 401) enthält in den Fassungen *A* und *B* geeignete Zusammensetzungen von Linsen, zwischen welche der zu beobachtende Gegenstand, z. B. eine doppelbrechende Krystallplatte, gelegt wird. Dem polarisirenden schwarzen Spiegel *P* wird das Licht des Wolkenhimmels durch einen in gewöhnlicher Weise belegten Spiegel *S* zugeführt, das Nicolsche Prisma *C* dient als Analysator.

367. **Chromatische Polarisation.** Unter dieser Bezeichnung fafst man diejenigen Farbenerscheinungen zusammen, welche doppelbrechende Körper im polarisirten Lichte zeigen. Zur Beobachtung

der Farben dünner Krystallblättchen im polarisirten Licht bietet sich am bequemsten der Gips (Marienglas) oder der Glimmer dar, dessen durchsichtige Krystalle sich mit Leichtigkeit in sehr dünne Blättchen (Fig. 402) spalten lassen. Bringt man ein solches Blättchen zwischen den Polarisator und den Analysator eines Polarisationsapparats, indem man es z. B. auf das Glastischchen des Nörrembergschen Apparats (Fig. 400) legt, so erscheint es, wenn es dünn genug ist, im allgemeinen mehr oder weniger lebhaft gefärbt, und nur in zwei bestimmten Lagen zeigt es keine Färbung. Sind z. B. die Schwingungsebenen des Polarisators und Analysators zu einander senkrecht gestellt, so zeigt ein Blick in den letzteren das Gesichtsfeld vollkommen dunkel; schiebt man jetzt ein Gipsblättchen ein, so hebt es sich farbig hell vom dunklen Grund ab, es sei denn, dafs man ihm zufällig eine von zwei ganz besonderen Lagen gegeben hat. Indem man nämlich das Blättchen dreht, kann man es leicht dahin bringen, dafs es ebenso dunkel erscheint wie das übrige Gesichtsfeld; es geschieht dies, wenn entweder eine gewisse Richtung *ab* oder die

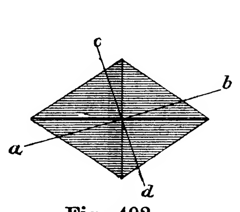


**Fig. 402.**
Gipsblättchen.

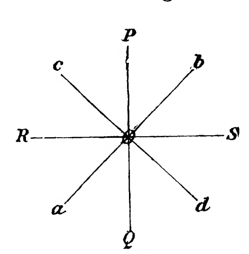


**Fig. 403.**
Zerlegung der Schwingungen.

dazu senkrechte Richtung *cd* mit der Schwingungsrichtung des Polarisators zusammenfällt; es erscheint dagegen am lebhaftesten gefärbt, wenn jene beiden Richtungen mit dieser Winkel von $45^0$ bilden. Jene beiden Richtungen *ab* und *cd* sind nämlich die Schwingungsrichtungen der beiden Strahlenbündel, die sich im Gispsblättchen vermöge seiner Doppelbrechung mit ungleicher Geschwindigkeit fortpflanzen. Ist daher eine dieser Richtungen mit der Schwingungsrichtung des vom Polarisator kommenden Lichts parallel, so geht dieses ohne Änderung seiner Schwingungsrichtung durch und wird vom Analysator ausgelöscht. Bildet aber die Richtung *ab* mit der Schwingungsrichtung *RS* (Fig. 403) des Polarisators einen Winkel, so mufs sich die nach *RS* gerichtete Bewegung in zwei Teilschwingungen nach *ab* und *cd* zerlegen, von denen sich die eine mit gröfserer Geschwindigkeit durch den Krystall fortpflanzt als die andere. Nach dem Austritt aus dem Krystall setzen sich daher die beiden Lichtschwingungen nicht mehr mit gleichen Phasen zu der ursprünglich gegebenen Bewegung wieder zusammen, sondern sie haben, da der eine Strahl gegen den anderen verzögert ist, einen Gangunterschied

oder eine Phasendifferenz gegeneinander erhalten. Beträgt diese Phasendifferenz ein ganzes Vielfaches einer ganzen Schwingung, so werden sich die beiden Schwingungen wieder zu einer geradlinigen Schwingung von der gleichen Richtung, wie die des einfallenden Lichtes war, zusammensetzen. Ist der Analysator gegen den Polarisator gekreuzt, so würde daher in diesem Falle das Gipsblättchen dunkel erscheinen müssen. Ist aber das einfallende Licht weifs, so hat man zu berücksichtigen, dafs für die verschiedenen Farben die Gangunterschiede bei derselben Dicke der Gipsplatte verschieden sind. Es werden daher nur diejenigen Farben vom Analysator ausgelöscht, für welche der Phasenunterschied einem ganzen Vielfachen der Schwingungsdauer gleich ist; die Platte wird daher einen Farbenton zeigen, der aus allen jenen Farben gemischt ist, welche der Aufhebung durch den Analysator entgangen sind. Ist die Phasendifferenz gleich einer halben, oder drei halben oder einem beliebigen ungeraden Vielfachen einer halben Schwingungsdauer, so setzen sich die Teilschwingungen ebenfalls wieder zu einer geradlinigen Schwingung zusammen; aber die Richtung derselben fällt nicht mehr in die Richtung der Schwingung des Polarisators, sondern liegt symmetrisch dazu in Bezug auf die Achsen *ab* und *cd* des Gipsblättchens. Bildet z. B. die Schwingungsrichtung des Polarisators einen Winkel von 45° mit den Richtungen *ab* und *cd*, so steht die Lichtschwingung nach dem Durchgange durch das Plättchen auf der Schwingungsrichtung des Polarisators senkrecht. Denn denken wir uns die einfallende Schwingung *RS* zerlegt nach *ab* und *cd*, so geht im einfallenden Licht die Bewegung der beiden Teilschwingungen gleichzeitig durch *O* hindurch nach *b* und nach *d*. Nach dem Durchgang durch die Gipsplatte *ab* ist die eine Schwingung gegen die andere um eine halbe Schwingungsdauer verschoben; geht die eine Schwingung durch *O* hindurch nach *Ob*, so geht jetzt die andere nach *Oc*, und sie setzen sich zu einer geradlinigen Schwingung längs *PQ* zusammen (vergl. auch S. 554). Dieses Licht wird daher ausgelöscht, wenn man den Analysator parallel zum Polarisator stellt, während bei gekreuzter Stellung dieses Licht am hellsten erscheint. Dreht man daher den Analysator aus der gekreuzten Stellung in die parallele, so verwandelt sich der Farbenton des Gipsplättchens in den komplementären, indem in der neuen Lage alle Farben, die vorher hell waren, ausgelöscht werden und umgekehrt alle, die vorher ausgelöscht waren, nun am hellsten erscheinen.

Über die Zusammensetzung des jeweiligen Farbentones erhalten wir unmittelbar Auskunft, wenn wir das Licht, welches durch ein Gipsblättchen gegangen ist, das sich unter 45° zwischen gekreuzten Nicols befindet, durch ein Prisma zerlegen. Im Spektrum zeigen sich alsdann an Stelle der Farben, die durch Interferenz vernichtet sind, dunkle Streifen; diese Streifen werden schwächer, wenn man den zweiten Nicol dreht und verschwinden ganz, wenn die Hauptschnitte der Nicols unter 45° zu einander geneigt sind. Dreht man den

zweiten Nicol weiter, bis er zum ersten parallel geworden, so erscheinen wieder schwarze Streifen, jedoch nun gerade an den Stellen, welche bei der gekreuzten Stellung am hellsten waren. Je dicker ein Gipsblättchen ist, desto mehr dunkle Streifen erscheinen im Spektrum, und desto mehr nähert sich seine Interferenzfarbe dem Weifs.

Alle Farbenabstufungen, welche Gipsblättchen verschiedener Dicke zeigen, lassen sich mit einem Male überblicken bei einer keilförmig oder konkav geschliffenen Gipsplatte; die Farben, in regelmäfsige Streifen parallel zur Schneide des Keiles oder in koncentrische Kreise um die dünnste Stelle der Platte geordnet, zeigen dieselbe Aufeinanderfolge wie in den Newtonschen Farbenringen.

Von besonderem Interesse ist die Erscheinung, welche senkrecht zur optischen Achse geschnittene Platten einachsiger Krystalle im konvergirenden polarisirten Licht, wenn man sie z. B. in einen sogen. mikroskopischen Polarisationsapparat (Fig. 401) bringt, darbieten (Achsenbilder). Derjenige Strahl, welcher die Platte senkrecht trifft, durchläuft sie in der Richtung der optischen Achse und erleidet keine Doppelbrechung. Jeder andere Strahl des kegelförmigen Bündels aber erfährt eine um so stärkere Doppelbrechung und hat zugleich innerhalb des Krystalls einen um so längeren Weg zurückzulegen, in je schrägerer Richtung er den Krystall durchläuft. So kommt es, dafs man immer gröfseren Gangunterschieden begegnet, je weiter man sich von der Achse des Lichtkegels nach aufsen hin entfernt, und da rings in gleichem Abstand von der optischen Achse alle Umstände, welche den Gangunterschied bedingen, die gleichen sind, so mufs der nämliche Gangunterschied und sonach auch dieselbe Interferenzfarbe stattfinden für alle Punkte eines Kreises, welchen man sich im Gesichtsfeld um den dem Achsenstrahl entsprechenden Punkt gezogen denkt. Man gewahrt daher als Linien gleicher Farbe oder isochromatische Kurven eine Reihe um diesen Mittelpunkt beschriebener farbiger Kreisringe (Fig. 404), welche bei gekreuzten Schwingungsebenen des Polarisationsapparats von einem schwarzen Kreuz (Fig. 400 *A*) durchsetzt erscheinen. Da nämlich die optische Achse zur Krystalloberfläche senkrecht ist, so entspricht jede durch den Mittelpunkt der Ringe gezogene gerade Linie *PQ*, *RS*, *ab*, *cd* (Fig. 403) einem Hauptschnitt. Alle Strahlen, welche vom Polarisator aus auf die Krystallplatte treffen, schwingen parallel *RS*; sie gehen daher, ohne eine Zerlegung zu erfahren, sowohl durch den Hauptschnitt *RS* als durch den Hauptschnitt *PQ*, indem sie parallel zu ersterem, senkrecht zu letzterem schwingen, und werden somit vom Analysator, dessen Schwingungsrichtung nach *PQ* gestellt ist, ausgelöscht. Stellt man dagegen die Schwingungsrichtung des Analysators zu derjenigen des Polarisators parallel, so erscheint statt des schwarzen Kreuzes ein weifses (Fig. 404 *B*), und die Ringe zeigen sich zu den vorigen komplementär gefärbt. Eine optisch-zweiachsige

Krystallplatte, deren Flächen senkrecht stehen auf der Mittellinie der optischen Achsen, zeigt (Fig. 405) zwei Ringgruppen, von denen jede eine optische Achse umgibt; die Ringe höherer Ordnung verschmelzen zu eigentümlich gestalteten krummen Linien (Lemniskaten), die sich um beide Achsenendpunkte herumschlingen. Wenn der durch die optischen Achsen gelegte Hauptschnitt der Krystallplatte mit einer der beiden gekreuzten Schwingungsrichtungen des Polarisationsapparats zusammenfällt, zeigt sich die zweifache Ringfigur von einem schwarzen Kreuz durchschnitten (Fig. 405 *A*); dreht man

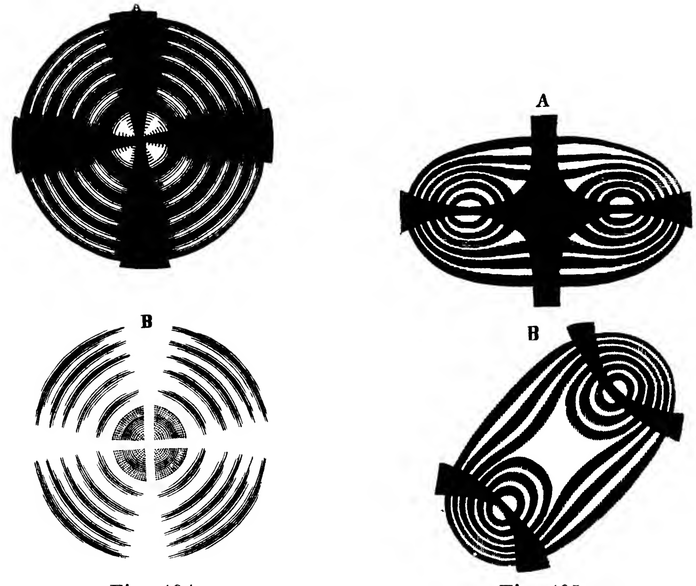



Fig. 404. Farbenringe in optisch-einachsigen Krystallen.

Fig. 405. Farbenringe in optisch-zweiachsigen Krystallen.

aber den Krystall aus dieser Lage heraus, so löst sich das Kreuz auf in zwei hyperbolisch gekrümmte dunkle Büschel, welche die Ringe rechtwinklig durchsetzen (Fig. 405 *B*).

Mittels der Farbenerscheinungen im polarisirten Licht, welche nur mit Doppelbrechung begabte Körper zeigen können, läſst sich nachweisen, daſs auch einfach brechende Körper, z. B. Glas, doppelbrechend werden, wenn man auf irgend eine Weise einen Spannungszustand in ihnen hervorruft. Eine dicke quadratische Glasplatte, in einem kleinen Schraubstock (Fig. 406) zusammengepreſst, zeigt im parallelen polarisirten Licht (z. B. im Nörrembergschen Polarisationsapparat (Fig. 400) ein dunkles Kreuz mit farbigen Fransen. Man kann einem Glasstück die Eigenschaft der Doppelbrechung dauernd erteilen, indem man es stark erhitzt und dann rasch abkühlt. Eine so behandelte kreisrunde Glasplatte zeigt farbige Ringe nebst einem

schwarzen Kreuz, ganz ähnlich wie eine senkrecht zur optischen Achse geschnittene Kalkspatplatte. Bei einer quadratförmigen Glasplatte (Fig. 407) erscheint ebenfalls ein schwarzes Kreuz und in jeder Ecke eine farbige Ringfigur, ähnlich einem Pfauenauge. Die Doppelbrechung der gekühlten Gläser, welche sich durch diese Farbenerscheinungen verrät, ist übrigens wesentlich verschieden von derjenigen der Krystalle. Das Ringsystem einer gekühlten Glasplatte zeigt sich nämlich schon in einem parallelen Bündel polarisirter Lichtstrahlen; die von der Mitte nach dem Umfang hin wachsenden Gangunterschiede können also nur daher rühren, dafs die Doppelbrechung bei ungeänderter Strahlenrichtung gegen den Rand der Platte hin zunimmt. Bei einem Krystall dagegen ist die Doppelbrechung in jedem seiner Punkte für die nämliche Strahlenrichtung die gleiche und ändert sich nicht von einem Punkte des Krystalls zum andern.

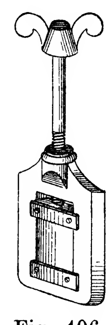


Fig. 406.
Geprefstes Glas.

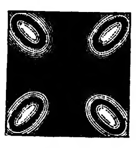


Fig. 407.
Farbenerscheinung in gekühltem Glas.

368. **Drehung der Polarisationsebene** (kreisförmige oder cirkulare Polarisation, Rotationspolarisation). Bringt man eine senkrecht zur optischen Achse geschnittene Platte eines einachsigen Krystalls in einen Polarisationsapparat mit parallelem Licht (z. B. zwischen zwei Nicolsche Prismen), so zeigen sich, weil ja in der Richtung der optischen Achse keine Zerlegung der Schwingungen stattfindet, beim Drehen des Analysators nur jene Abwechselungen von Helligkeit und Dunkelheit, welche auch ohne die Krystallplatte stattfinden würden. Eine Ausnahme hiervon macht jedoch der Bergkrystall oder krystallisirte Quarz. Eine senkrecht zur optischen Achse geschnittene Quarzplatte von geeigneter Dicke erscheint nämlich im Polarisationsapparat gefärbt, und ihre Farbe ändert sich beim Drehen des Analysators nach der Reihenfolge Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo, Violett (*r*, *o*, *g*, *gr*, *b*, *i*, *v*). Zerlegt man das aus dem Analysator austretende farbige Licht durch ein Prisma, so gewahrt man im Spektrum einen dunklen Streifen (oder bei dickeren Platten mehrere), der während der Drehung durch das Spektrum wandert, indem er die Farben desselben der Reihe nach austilgt. Der Analysator kann aber nur solche Schwingungen auslöschen, die senkrecht zu seiner Schwingungsebene folgen. In dem vom Polarisator kommenden weifsen Licht haben alle Farben ein und dieselbe (in Fig. 408 durch einen Pfeil angedeutete) Schwingungsrichtung und würden daher, wenn die Quarzplatte nicht vorhanden wäre, durch

den gekreuzt gestellten Analysator sämtlich ausgelöscht werden. Bei Gegenwart der Quarzplatte aber verschwindet nur je eine Farbe, und zwar mufs man, wenn die Platte 3,75 mm dick ist, den Analysator um $60^0$ aus der gekreuzten Stellung herausdrehen, damit die roten Strahlen ausgelöscht werden und die Platte die entsprechende grüne Ergänzungsfarbe zeigt. In dem aus der Quarzplatte kommenden Licht mufs demnach die Schwingungsrichtung der roten Strahlen senkrecht stehen zur gegenwärtigen Stellung der Schwingungsebene des Analysators; sie ist also durch die Einwirkung des Quarzes um einen Winkel von $60^0$ gedreht worden und nimmt jetzt die Lage *rr'* (Fig. 408, obere Hälfte) ein. Ebenso finden wir, dafs die Schwingungs-

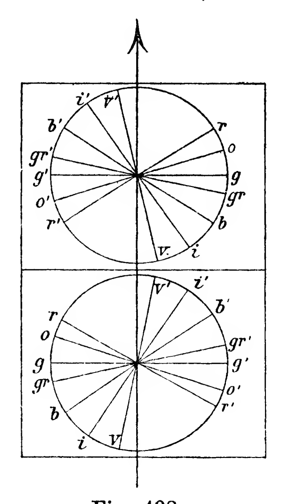



**Fig. 408.**
**Drehung der Schwingungsebene des polarisirten Lichts.**

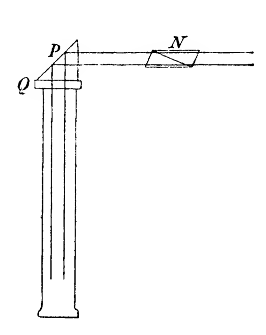



**Fig. 409.**
**Polarisation durch diffuse Zurückwerfung.**

ebene der gelben Strahlen eine Drehung von $90^0$ (*gg'*) und diejenige der violetten eine solche von $165^0$ (*vv'*) erlitten hat. Die Wirkung der Quarzplatte besteht also darin, dafs sie der Schwingungsebene der polarisirten Strahlen eine Drehung (Rotation) erteilt, welche für die verschiedenen einfachen Farben verschieden ist, und zwar zunimmt vom Rot zum Violett. Durch diese Auseinanderlegung der Farben nach verschiedenen Schwingungsrichtungen wird eine Zerlegung des weifsen Lichts in seine farbigen Bestandteile, eine Art Farbenzerstreuung, bewirkt, welche Rotationsdispersion genannt worden ist. Für ein und dieselbe einfache Farbe ist die Drehung der Dicke der Platte proportional. Wenn man daher für eine bestimmte Dicke die Drehungswerte kennt, so kann man sie für jede andere Dicke sofort angeben. Für die den hauptsächlichsten Fraunhoferschen Linien entsprechenden einfachen Farben bringt eine 1 mm dicke Quarzplatte die folgenden Drehungen hervor:

| B | C | D | E | F | G | H |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 15° | 17° | 22° | 27° | 32° | 42° | 51°. |

Bei manchen Bergkrystallen mufs man, damit die Farben nach ihrer Reihenfolge im Spektrum vom Rot bis zum Violett ausgelöscht werden, den Analysator in der Richtung des Uhrzeigers, also rechts herum drehen; bei anderen aber mufs man, um denselben Erfolg zu erzielen, links herum drehen (Fig. 408, untere Hälfte). Erstere heifsen rechts-, letztere linksdrehende Krystalle; beide Arten drehen bei gleicher Dicke die Schwingungsebene derselben einfachen Farbe um gleichviel.

Die verschiedenen Mischfarben, welche beim Drehen des Analysators der Reihe nach erscheinen, werden bei dem folgenden hübschen Versuch (Lallemand, 1869) gleichzeitig sichtbar. In einem cylindrischen Standglas (Fig. 409) befindet sich Wasser, das durch Zusatz von ein wenig alkoholischer Mastixlösung schwach milchig getrübt ist. Man bedeckt die Mündung des Gefäfses mit der Quarzplatte *Q*, und legt auf diese ein totalreflektirendes Prisma *P*, welches ein von einem Nicolschen Prisma *N* kommendes polarisirtes Lichtbündel *NP* durch die Quarzplatte von oben her in die trübe Flüssigkeit sendet. Das diffuse Licht, welches von diesem Lichtbündel seitwärts ausstrahlt, ist nun gefärbt, und zeigt gleichzeitig ringsum alle die verschiedenen Farben, welche bei Anwendung eines Polarisationsapparats beim Drehen des Analysators nach und nach auftreten würden. Eine trübe Flüssigkeit wirkt nämlich in eigentümlicher Weise polarisirend; die feinen Teilchen der Trübung werfen nur Licht zurück, dessen Schwingungen senkrecht zur Reflexionsebene, d. i. zu der durch den einfallenden und den reflektirten Strahl gelegten Ebene, erfolgen. Stellt also in Fig. 408 der Kreis den Querschnitt des Glascylinders vor, so werden nach irgend einer seitlichen, z. B. nach der durch den Pfeil angedeuteten Richtung nur Schwingungen reflektirt, welche zu dieser Richtung senkrecht sind, also die gelben Schwingungen $gg'$ vollständig, von den übrigen jeweils nur die nach $gg'$ gerichtete Komponente; und gleiches gilt für jede andere Richtung, so dafs die trübe Flüssigkeit dem Beschauer nach jeder Richtung eine andere Mischfarbe zeigt.

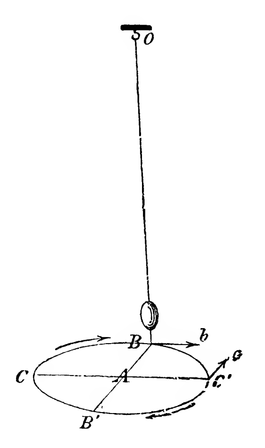


Fig. 410.
Kreisförmig schwingendes Pendel.

Um den Vorgang bei der Drehung der Schwingungsebene im Quarz zu verstehen, erinnern wir uns an das kreisförmig schwingende Pendel (Fig. 410), welches den Kreis $BC'B'CB$ mit gleichförmiger Geschwindigkeit durchläuft, wenn man ihm, nachdem es aus der Gleichgewichtslage *A* nach *B* gebracht ist, einen richtig bemessenen Stofs in der Richtung *Bb* erteilt. Rechnen wir einen Hin- und Her-

gang als eine ganze Schwingung, so hatte das Pendel bereits eine Viertelschwingung zurückgelegt, als es den Antrieb in der Richtung *Bb* empfing. Es ergibt sich also, daſs zwei gleiche, zu einander senkrecht geradlinig schwingende Bewegungen, von welchen die eine der anderen um eine Viertelschwingung voraus ist, sich zu einer kreisförmigen Bewegung zusammensetzen. In dem durch die Zeichnung versinnlichten Fall geht die kreisförmige Bewegung in der Richtung des Uhrzeigers (oder rechts herum) vor sich. Wird dagegen der Stoſs in entgegengesetzter Richtung erteilt, oder wird das Pendel zuerst nach *AC'* in Schwingung versetzt und ihm sodann, sobald es in *C'* angekommen ist, ein Stoſs in der zu *AB* parallelen Richtung *C'c* gegeben, so entsteht eine Kreisbewegung links herum. Wird der Stoſs mehr oder weniger kräftig geführt, als vorhin angenommen wurde, oder erfolgt derselbe, während das Pendel zwischen *A* und *B* unterwegs ist, so durchläuft der Pendelkörper eine elliptische Bahn. Dagegen kommt eine geradlinige Bewegung zu stande, wenn der seitliche Stoſs in dem Augenblick erfolgt, in welchem das Pendel gerade durch seine Gleichgewichtslage *A* hindurchgeht, wenn also die eine Bewegung entweder gar nicht oder um eine Anzahl halber Schwingungen vor der anderen voraus ist, und zwar erfolgt die geradlinige Schwingung, wie leicht ersichtlich ist, je nachdem die Bewegung im Augenblick des nach *C'* erteilten Stoſses, nach *B* oder nach *B'* gerichtet ist, in den Quadranten *BAC'*, *CAB'*, oder in den Quadranten *BAC*, *B'AC'* (vergl. auch S. 548).

Diese Bewegungszustände eines Pendelkörpers lassen sich bei den Lichtschwingungen verwirklichen mit Hülfe dünner Krystallblättchen; besonders eignet sich hierzu der Glimmer, der sich leicht in sehr dünne Blättchen spalten läſst. Bringt man ein dünnes Glimmerblättchen derart in den Polarisationsapparat, daſs die Schwingungsrichtungen *ab* und *cd* (Fig. 411) der beiden Strahlen, welche sich in ihm vermöge seiner Doppelbrechung mit ungleicher Geschwindigkeit fortpflanzen, Winkel von 45$^0$ bilden mit der Schwingungsrichtung *RS* des Polarisators, so treten aus dem Blättchen zwei gleichhelle Strahlen, von denen der eine nach *ab*, der andere nach *cd* schwingt. Das in *O* an der Austrittsfläche des Blättchens liegende Ätherteilchen wird sonach, wie der Pendelkörper, gleichzeitig von zwei zu einander senkrechten Antrieben erfaſst und vollführt eine kreisförmige, elliptische oder geradlinige Bewegung, je nach dem Betrag des Vorsprungs, welchen die eine Schwingung gegenüber der anderen besitzt. Beträgt dieser Vorsprung eine Viertelschwingung, was der Fall ist, wenn der eine Strahl vermöge seiner gröſseren Fortpflanzungsgeschwindigkeit dem anderen um eine Viertelwellenlänge voraus ist, so nimmt das Teilchen eine kreisförmige Bewegung an, rechts oder links herum, je nachdem der nach *ab* oder der nach *cd* schwingende Strahl voraneilt: diese Bewegung teilt sich den längs der Strahlenrichtung folgenden Ätherteilchen mit; jedes bewegt sich, indem es seinen Umlauf etwas später beginnt als das vorhergehende, in einem Kreis, dessen Ebene zum Strahl senkrecht steht, um diesen herum, so daſs, wenn man in

irgend einem Augenblick alle gleichzeitigen Lagen der Ätherteilchen durch eine krumme Linie verbunden denkt, eine Wellenlinie $o'a''b''c''d'$ (Fig. 412) entsteht, die sich schraubenförmig um den Strahl herumwindet, indem jeder Wellenlänge ($o'd' = od$) ein voller Umgang der Schraube entspricht. Einen Lichtstrahl von dieser Beschaffenheit nennt man kreisförmig oder cirkular polarisirt und bezeichnet zum Unterschied die sonst kurzweg so genannten polarisirten Strahlen, deren Schwingungen in geraden, zur Strahlrichtung senkrechten Linien und in einer bestimmten durch den Strahl gelegten Ebene vor sich gehen, als geradlinig (linear) polarisirt. Ein kreisförmig polarisirter Lichtstrahl kann, da seine Beschaffenheit ringsherum die gleiche ist, nach verschiedenen Seiten kein verschiedenes Verhalten zeigen, wie ein geradlinig polarisirter Strahl; er verhält sich, mit dem

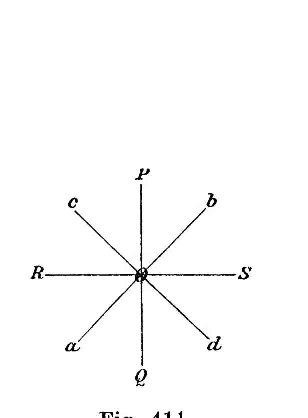


Fig. 411.
Zerlegung der Schwingungen.

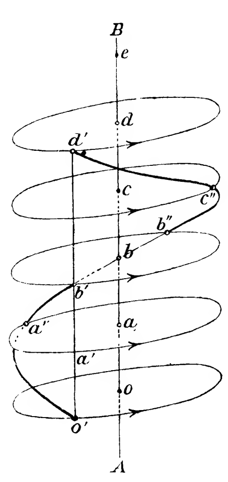


Fig. 412.
Kreisförmig polarisirter Lichtstrahl.

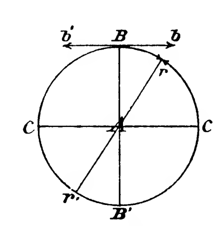


Fig. 413.
Zusammenwirkung zweier entgegengesetzt kreisförmiger Schwingungen.

Analysator untersucht, anscheinend wie ein natürlicher Lichtstrahl. Schickt man ihn jedoch durch ein Viertelwellen-Glimmerblättchen, so wird er, weil dadurch der vorhandene Gangunterschied der beiden Schwingungen *ab* und *cd* (Fig. 411), welcher $^1/_4$-Wellenlänge beträgt, entweder aufgehoben, oder auf $^1/_2$-Wellenlänge gebracht wird, in geradlinig polarisirtes Licht verwandelt, während das natürliche Licht unter diesen Umständen als solches fortbesteht.

Zwei senkrecht zu einander polarisirte Lichtstrahlen geben immer eine resultirende Lichtbewegung, deren Intensität gleich der Summe der Intensitäten der beiden ursprünglichen Strahlen ist. Sie geben also keine Interferenzen. Wenn man die beiden Strahlenbündel eines Interferenzapparats, z. B. des Interferenzprismas (353), durch geeignete Vorrichtungen polarisirt in Ebenen, die zu einander senkrecht stehen, so verschwinden die Interferenzstreifen (Beweis für die Transversalität des Lichts von Fresnel und Arago, 1816). Dasselbe gilt von

der Erzeugung stehender Lichtwellen (362). Wird bei dem Wienerschen Versuche das einfallende Strahlenbündel unter 45° von dem ebenen Spiegel reflektirt, so kreuzen sich die einfallenden und die zurückgeworfenen Strahlen unter rechten Winkeln. Ist das Licht geradlinig polarisirt und erfolgen die Schwingungen senkrecht zur Einfallsebene, so fallen die Schwingungen in dem einfallenden und dem zurückgeworfenen Strahl in die gleiche Richtung und setzen sich zu stehenden Wellen mit Knoten und Bäuchen zusammen. Erfolgen aber die Schwingungen in der Einfallsebene, so liegen diejenigen des zurückgeworfenen Strahles senkrecht zu denjenigen des einfallenden Strahles, und es entstehen keine stehenden Wellen. Durch diesen Versuch hat Wiener nachgewiesen, dafs das Licht, welches durch Reflexion unter dem Polarisationswinkel vollständig polarisirt ist, seine Schwingungen senkrecht zur Einfallsebene ausführt (vgl. 364). Die Interferenzerscheinungen der chromatischen Polarisation (367) treten nur auf, wenn die beiden in den Krystallplatten senkrecht zu einander schwingenden Strahlen von einem geradlinig polarisirten Strahle (Polarisator) herrühren und nach dem Durchgange durch den Krystall wieder mittels des Analysators auf eine gemeinsame Schwingungsebene zurückgeführt werden.

Empfängt ein Pendelgewicht, während es sich in der Entfernung *AB* (Fig. 413) von seiner Gleichgewichtslage *A* befindet, gleichzeitig zwei entgegengesetzte gleichkräftige Stöfse nach *Bb* und *Bb'*, von denen jeder für sich im Verein mit dem Antrieb, den das Pendel in der Richtung *BA* bereits besitzt, eine Kreisbewegung, der eine rechts herum, der andere links herum, hervorbringen würde, so wird das Pendel, da die beiden Stöfse sich aufheben, entlang der geraden Linie *BB'* hin und her schwingen. Erfolgt der zweite Stofs später, nachdem der Pendelkörper vermöge des ersten bereits den Kreisbogen *Br* zurückgelegt hat, so entsteht ebenso eine geradlinige Bewegung längs *rr'*. Überträgt man diese Betrachtung auf die Lichtschwingungen, so erkennt man, dafs aus dem Zusammenwirken zweier entgegengesetzt kreisförmig polarisirter Lichtstrahlen von sonst gleicher Beschaffenheit ein geradlinig polarisirter Lichtstrahl hervorgeht, und dafs umgekehrt jeder geradlinig polarisirte Lichtstrahl in zwei gleichhelle, entgegengesetzt kreisförmig polarisirte Strahlen zerlegt oder durch sie ersetzt werden kann. Diese in den allgemeinen Bewegungsgesetzen begründete Vorstellung würde ohne praktische Bedeutung bleiben, wenn es nicht Körper gäbe, welche auf rechts kreisförmiges Licht in anderer Weise wirken als auf links kreisförmiges. Ein solcher Körper ist der Quarz. Die durch ihn bewirkte Drehung der Schwingungsebene erklärt sich nämlich nach Fresnel daraus, dafs sich längs der Achse eines Bergkrystalls entgegengesetzt kreisförmig polarisirte Strahlen mit verschiedener Geschwindigkeit fortpflanzen (cirkulare Doppelbrechung). Ein geradlinig polarisirter Lichtstrahl mufs sich alsdann beim Eintritt in die Bergkrystallplatte in zwei entgegengesetzt kreisförmige zerlegen, welche sich, nachdem sie die Platte mit ungleicher Schnelligkeit durchlaufen haben, bei ihrem Austritt wieder zu einem geradlinig polarisirten Strahl vereinigen, dessen Schwingungsebene nach rechts oder nach links von derjenigen des einfallenden Strahles abweicht, je nachdem in der Quarzplatte der rechts oder der links kreisförmige Antrieb voraneilt und die an der Austrittsfläche gelegenen Ätherteilchen früher erfafst.

Das Vermögen, die Schwingungsebene des geradlinig polarisirten Lichts zu drehen, ist aufser dem Quarz nur wenigen festen Körpern eigen, z. B. dem chlorsauren Natrium, dem Zinnober, dem schwefelsauren Strychnin; dagegen besitzen viele Flüssigkeiten diese Fähigkeit. Nach rechts drehen deutsches Terpentinöl, Citronenöl, alkoholische Kampferlösung, wässerige Lösungen von Rohrzucker, Traubenzucker, Dextrin, Weinsäure etc.; nach links französisches Terpentinöl, Kirschlorbeerwasser, wässerige Lösungen von arabischem Gummi, Inulin, Chinin, Morphin, Strychnin etc. Ferner besitzen die meisten ätherischen Öle diese Fähigkeit. Da das Drehungsvermögen dieser Flüssigkeiten viel geringer als dasjenige des Quarzes ist, so mufs man, um dasselbe genau beobachten zu können, viel dickere Schichten anwenden; man füllt daher die Flüssigkeit in Röhren (Fig. 414), welche an den Enden mit ebenen Glasplatten verschlossen sind. Die Drehung wächst einerseits im Verhältnis der Dicke der Schicht, d. h. der Länge der Röhre, andererseits im Verhältnis des Gehalts der Flüssigkeit an wirksamem (aktivem) Stoff (z. B. Zucker). Da man ermittelt hat, dafs bei einer

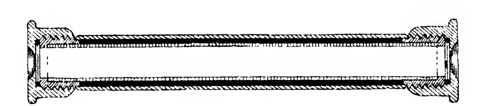


**Fig. 414.**
**Röhre für aktive Flüssigkeiten.**

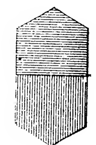


**Fig. 415.**
**Doppelplatte.**

Röhrenlänge von 20 cm die Drehung für jedes Gramm Zucker pro 100 ccm Lösung $1^1/_3{}^0$ (für Natriumlicht) beträgt, so läfst sich aus dem beobachteten Drehungswinkel der Zuckergehalt einer gegebenen Lösung sofort bestimmen. Als Hülfsmittel zur genauen Bestimmung selbst geringer Drehungen dient Soleils doppelte Quarzplatte (Doppelplatte, Fig. 415). Sie besteht aus zwei senkrecht zur optischen Achse geschnittenen, nebeneinander gekitteten Quarzplatten, von denen die eine rechts-, die andere linksdrehend und jede 3,75 mm dick ist. Bei dieser Dicke nämlich erfahren die gelben Strahlen eine Drehung von 90° (Fig. 408) und werden daher, wenn sich die Platte zwischen parallel gestellten Nicolschen Prismen befindet, ausgelöscht, so dafs beide Plattenhälften den nämlichen violetten Farbenton zeigen. Da in dieser Farbenmischung gerade das Gelb, also diejenige Farbe, für welche das menschliche Auge am empfindlichsten ist, fehlt, so wird bei der geringsten Drehung des einen Nicols der Farbenton der einen Plattenhälfte mehr ins Rote, derjenige der anderen mehr ins Blaue übergehen, weshalb man jenen Farbenton die empfindliche oder Übergangsfarbe nennt. Bringt man nebst der Doppelplatte eine mit Zuckerlösung gefüllte Röhre zwischen die parallel gestellten Nicols, so wird, da die Zuckerlösung die Schwingungsebene nach rechts dreht, für die rechts drehende Plattenhälfte die Drehung ver-

mehrt, für die links drehende vermindert; dort kommen jetzt die orangefarbigen, hier die grünen Strahlen zur Vernichtung; jene Hälfte erscheint daher mehr blau, diese mehr rot gefärbt. Um die stattgehabte Drehung zu bestimmen, braucht man nur das eine Nicolsche Prisma so weit zu drehen, bis in beiden Plattenhälften die gleiche violette Färbung wiederhergestellt ist. Vorrichtungen, welche den Zweck haben, auf diesem Wege den Gehalt von Zuckerlösungen zu bestimmen, heifsen Saccharimeter (Zuckermesser). Dasjenige von Mitscherlich besteht einfach aus Polarisator und Analysator, zwischen die die Röhre eingelegt wird. Soleils Saccharimeter (Fig. 416) enthält zwischen den beiden Nicolschen Prismen $S$ und $T$, deren Schwingungsebenen ein für allemal parallel gestellt sind, die Doppelplatte bei $r$. Die Farbenänderung, welche die bei $m$ ein-

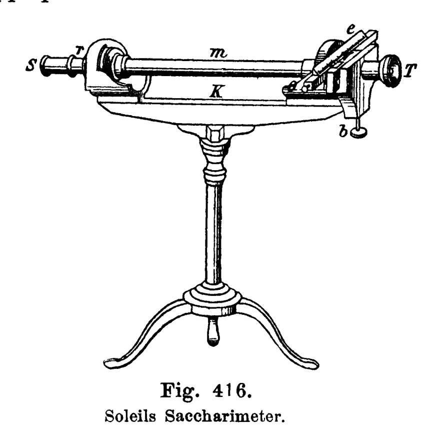



Fig. 416.
Soleils Saccharimeter.

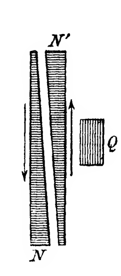



Fig. 417.
Kompensator.

geschaltete, mit zuckerhaltiger Flüssigkeit gefüllte Röhre hervorbringt, wird nicht durch Drehung des Polariskops $T$ ausgeglichen, sondern durch den bei $c$ angebrachten „Kompensator" (Ausgleicher). Die aus $m$ austretenden Strahlen gehen nämlich zuerst durch eine rechtsdrehende Quarzplatte $Q$ (Fig. 417) und dann durch zwei aus linksdrehendem Quarz geschnittene Keile $N$ und $N'$, die mittels eines Triebes $b$ (Fig. 416) gegeneinander verschoben werden können. Bei einer bestimmten Stellung des Triebes stellen sie eine Quarzplatte vor, welche ebenso dick ist, wie die Quarzplatte $Q$ und daher deren Rechtsdrehung aufhebt. Verschiebt man sie aus dieser Stellung nach der einen oder der anderen Seite, so wird die Strecke, welche ein Strahl in beiden Keilen zusammen zu durchlaufen hat, vermehrt oder vermindert; die beiden Keile im Verein bilden sonach eine linksdrehende Quarzplatte, deren Dicke innerhalb gewisser Grenzen nach Belieben verändert und zwar derjenigen der rechtsdrehenden Platte $Q$ gleich oder gröfser oder kleiner gemacht werden kann. Die Veränderung der Dicke kann mittels des Zeigers $v$ an dem kleinen Mafsstab $e$ bis auf $^1/_{100}$ mm abgelesen werden. Nachdem man den Farben-

unterschied zwischen den beiden Hälften der Doppelplatte, den die Zuckerlösung vermöge ihrer Rechtsdrehung hervorbringt, durch den Kompensator ausgeglichen hat, erfährt man durch Ablesung des Mafsstabes die Dicke einer Quarzplatte, welche dasselbe Drehungsvermögen besitzt wie die Zuckerlösung, und da man weifs, dafs eine Zuckerlösung, welche auf 100 ccm 16,35 g Zucker enthält, in der 20 cm langen Röhre eine ebenso starke Drehung bewirkt wie eine 1 mm dicke Quarzplatte, so braucht man nur die abgelesene Zahl mit 16,35 zu multipliziren, um das in 100 ccm enthaltene Zuckergewicht zu kennen. Wenn die zu untersuchende Flüssigkeit gefärbt ist, so erscheinen die beiden Plattenhälften in einem anderen weniger empfindlichen Farbenton; es wird daher dem Apparat noch eine aus

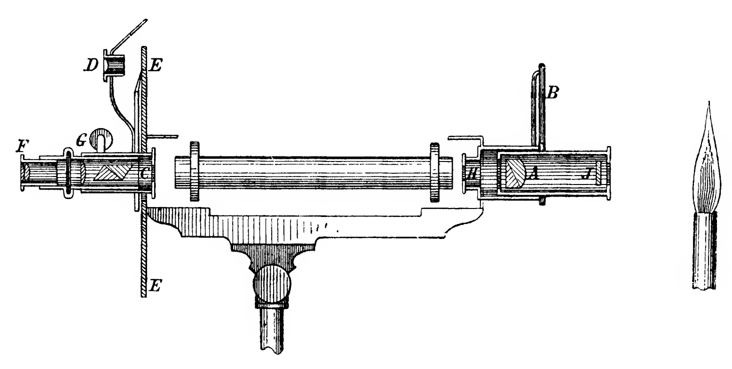



**Fig. 418.**
**Halbschattenapparat von Laurent.**

einer Quarzplatte und einem Kalkspatprisma bestehende Vorrichtung zum Erzeugen des jeweils empfindlichsten Farbentones beigegeben, die vor dem Polarisator *S* angebracht wird.

Als Saccharimeter sind in neuerer Zeit die Halbschattenapparate in Aufnahme gekommen, welche so genannt werden, weil sie nicht, wie das Soleilsche Saccharimeter, die Herstellung gleicher Färbungen, sondern gleicher Beschattungen der beiden Hälften des Gesichtsfeldes erfordern und hiermit die Schwierigkeiten vermeiden, mit welchen die Beurteilung von Farbentönen behaftet ist. Das Halbschattensaccharimeter von Laurent (Fig. 418) enthält als Polarisator ein Kalkspatprisma *A*, welches mittels des Hebels *B* um die Achse des Instruments gedreht werden kann, als Analysator ein ebenfalls drehbares Nicolsches Prisma *C*, dessen Stellung mittels Nonius und Lupe *D* auf dem Teilkreis *EE* abgelesen werden kann; die Linsen *F* und *G* bilden ein kleines Fernrohr, welches auf die runde Öffnung bei *H* einzustellen ist. Die linke Hälfte dieser Öffnung ist von einer dünnen, zur optischen Achse parallel geschliffenen Quarzplatte *Q* (Fig. 419, *I*) bedeckt, deren Dicke so bemessen ist, dafs der Gangunterschied der beiden durch Doppelbrechung in ihr entstehenden

Strahlen eine halbe Wellenlänge des gelben Lichts beträgt. Der Apparat wird nämlich durch das gelbe Licht einer Natriumflamme beleuchtet, welches, ehe es auf den Polarisator trifft, durch eine Platte *J* (Fig. 418) von doppeltchromsaurem Kalium gehen mufs, wodurch es der noch beigemischten schwachen grünen, blauen und violetten Strahlen beraubt wird und sonach als möglichst einfaches gelbes Licht nach *A* gelangt. Steht nun die Schwingungsebene des Polarisators in der Richtung *OB* (Fig. 419, *I*), so dafs sie mit der Achsenrichtung *OA* der Quarzplatte einen Winkel *a* bildet, so kann man für die freie (rechte) Hälfte des Gesichtsfelds die Schwingung *OB* in die beiden Teilschwingungen *OA* und *Ob* zerlegt denken, für die von der Quarzplatte bedeckte (linke) Hälfte aber in die Teilschwingungen *OA* und *Ob'*, deren letztere wegen des durch die Quarzplatte ihr erteilten Gangunterschieds von einer halben Wellenlänge der Schwingung *Ob* gerade entgegengesetzt ist. Die Teilschwingungen *OA* und *Ob'* geben durch ihr Zusammenwirken in der linken Hälfte des Gesichtsfelds die Schwingungsrichtung *OB'*, während in der rechten Hälfte die ursprüngliche Schwingungsrichtung *OB* unverändert bestehen bleibt.

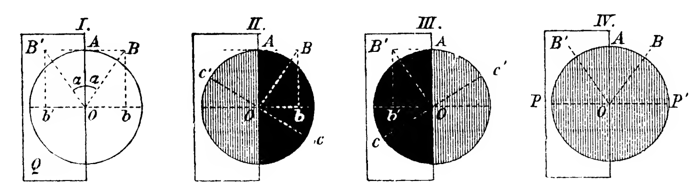



**Fig. 419.**
**Zum Halbschattenapparat.**

Stellt man nun die Schwingungsebene des Analysators nach *Oc* senkrecht zu *OB* (Fig. 419, *II*), so wird die rechte Hälfte des Gesichtsfelds völlig verdunkelt, während die linke noch Licht durchläfst; wird dagegen die Schwingungsebene des Analysators in die Lage *Oc'* (Fig. 419, *III*) senkrecht zu *OB'* gebracht, so wird die linke Hälfte dunkel, die rechte hell erscheinen; stellt man endlich jene Schwingungsebene *OP* (Fig. 419, *IV*) senkrecht zu *OA*, so zeigen beide Hälften gleiche Helligkeit. Diese letztere Stellung entspricht dem Nullpunkt der Teilung, und man sieht, dafs sofort ein schroffer Wechsel der Helligkeiten der beiden Hälften des Gesichtsfelds eintreten mufs, wenn man den Analysator aus dieser Stellung nach der einen oder anderen Seite dreht. Schaltet man nun zwischen der Öffnung *H* (Fig. 418) und dem Analysator *C* eine mit Zuckerlösung gefüllte, an beiden Enden mit Glasplatten verschlossene Röhre ein, während der Analysator auf Null steht, so werden die beiden Hälften des Gesichtsfelds ungleich hell erscheinen, weil die Zuckerlösung die beiden Schwingungsrichtungen *OB* und *OB'* in gleichem Sinn (nach rechts) um einen gewissen Winkel dreht, und man mufs, um wieder gleiche Helligkeit herzustellen, den Analysator um denselben Winkel drehen.

Aus diesem Drehungswinkel ergibt sich dann leicht die im Liter Lösung enthaltene Zuckermenge; für die praktische Anwendung kann man natürlich die Teilung des Kreises *EE* so einrichten, daſs sie unmittelbar die Zuckermengen angibt. Für schwach drehende Lösungen kann man auch einen Kompensator nach Art des Soleilschen (Fig. 417) verwenden, um die Drehung der Lösung auszugleichen und die Felder auf gleiche Intensität zu bringen. Die Teilung am Kompensator läſst direct die Zuckermengen ablesen.

Zur Bestimmung des Drehungswinkels sowohl für Zuckerlösungen als auch für andere wirksame Flüssigkeiten dient ferner das Polaristrobometer von Wild (Fig. 420, kleineres Modell). Das Rohr *rr* enthält ein Savartsches Polariskop; dasselbe besteht aus zwei unter 45° zur optischen Achse geschnittenen, 20 mm dicken Quarzplatten, deren Hauptschnitte sich rechtwinklig kreuzen und mit der Schwingungsebene des Okularnicols *o* Winkel von 45° bilden. Auſserdem befinden sich in dem Rohr noch die Linsen *l* und *m*, welche wie ein schwach vergröſserndes astronomisches Fernrohr wirken; die Stelle des kleinen Pfeils wird von dem Fadenkreuz eingenommen. Dieser Teil des Apparats für sich genommen kann dazu dienen, die geringsten Spuren polarisirten Lichts zu entdecken, und wird daher als „Polariskop“ bezeichnet; denn wenn man durch denselben nach einer Stelle hinsieht, von welcher polarisirtes Licht herkommt, so erscheinen geradlinige farbige Interferenzstreifen, und zwar um so deutlicher ausgeprägt, je vollkommener die einzelnen Strahlen polarisirt sind. Das Wildsche Instrument trägt nun bei *a* noch ein Nicolsches Prisma *d*, dessen Hülse inmitten des Teilkreises *bb* befestigt ist und samt diesem mittels des Handgriffs *g* an dem feststehenden Zeiger *n* vorübergedreht werden kann. Steht der Nicol *a* so, daſs seine Schwingungsebene mit einem der Hauptschnitte des Quarzplattenpaars zusammenfällt und sonach mit der Schwingungsebene des Okularnicols einen Winkel von 45° bildet, so sind die Streifen verschwunden: sie erscheinen aber sofort wieder, wenn man zwischen die Federn *ff'* die mit der wirksamen Flüssigkeit gefüllte Röhre einlegt. Nun dreht man die Scheibe *bb* samt Nicol *a* so lange, bis die Streifen wieder verschwunden sind, und kann nun am Zeiger *n* die Drehung ablesen, welche derjenigen der Flüssigkeit gleich und entgegengesetzt ist. Die Einstellung auf das Verschwinden der Streifen läſst sich mit groſser Schärfe ausführen, namentlich wenn man im dunkeln Zimmer das homogene Licht einer Natriumflamme

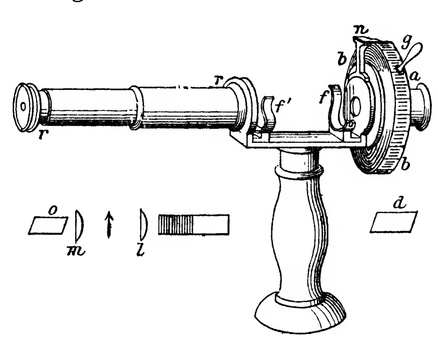


Fig. 420.
Polaristrobometer von Wild.

anwendet. — Die aufgeführten Saccharimeter sowie das Polaristrobometer werden in der Zuckerfabrikation zur Bestimmung des Gehalts der zu verarbeitenden Säfte und in der Heilkunde als **Diabetometer** zur Bestimmung des Zuckers im Urin der Harnruhrkranken gebraucht.

369. **Magnetische Drehung der Polarisationsebene** (Faraday, 1845). Zwischen zwei Eisenstücke, welche die Pole eines kräftigen Elektromagnets bilden und längs der Verbindungslinie der Pole in der Richtung *ad* (Fig. 421) durchbohrt sind, um hindurchsehen zu können, bringe man ein Stück (*g*) von Faradays „schwerem Glas“ (kieselborsaurem Blei) oder eine mit Schwefelkohlenstoff gefüllte, an den Enden mit ebenen Glasplatten verschlossene Röhre. Sendet man einen Lichtstrahl hindurch, der zuvor bei *d* durch ein Nicolsches Prisma gegangen und dadurch polarisirt ist, so sieht man durch ein zweites bei *a* angebrachtes Nicolsches Prisma, dessen Hauptschnitt zu demjenigen des ersten senkrecht steht, kein Licht, solange der Elektromagnet nicht in Thätigkeit ist. Erregt man aber den Elektromagnet, indem man den galvanischen Strom durch seine Windungen schickt, so wird das Gesichtsfeld wieder hell, und man mufs das Nicolsche Prisma bei *a* um einen gewissen Winkel drehen, damit das Licht wieder verschwinde. Die Schwingungsebene der durch das Glas gegangenen polarisirten Lichtstrahlen hat demnach unter dem Einflufs des Magnets eine Drehung erlitten gleich derjenigen, welche man dem Nicolschen Prisma erteilen mufste, um wieder Dunkelheit herbeizuführen. Bei Einschaltung einer Soleilschen Doppelplatte (368) verrät sich die Drehung noch auffallender durch ungleiche Färbung der beiden Plattenhälften. Denselben Erfolg erzielt man auch ohne Magnet, wenn man das Glasstück mit Drahtwindungen umgibt und durch diese einen starken galvanischen Strom leitet, und zwar erfolgt die Drehung nach der Richtung, in welcher der Strom die Drahtwindungen durchfliefst. Alle durchsichtigen Körper, selbst Gase, zeigen diese Erscheinung, wenn auch in geringerem Grade als jene Glassorte; auch in dünnen durchsichtigen Schichten von Eisen, Kobalt und Nickel hat Kundt (1884) diese Drehung nachgewiesen. Sie vollzieht sich in den meisten Körpern in der Richtung des magnetisirenden Stromes, in einigen magnetischen Salzlösungen aber in entgegengesetztem Sinne. Die magnetische Drehung ist der Weglänge des Strahles im Magnetfelde in der Richtung der Kraftlinien und der Feldstärke proportional, und wächst ebenso wie die natürliche Drehung mit der abnehmenden Wellenlänge des Lichtes.

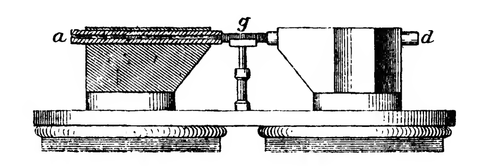


Fig. 421.
Magnetische Drehung der Polarisationsebene.

Auch durch Reflexion eines polarisirten Lichtstrahles an der

polirten Fläche eines Magnetpols wird dessen Polarisationsebene gedreht (Kerr).

Einen anderen Einfluſs des Magnetismus auf die Lichtschwingungen hat in jüngster Zeit Zeemann entdeckt (1897). Wenn eine Natriumflamme in ein sehr starkes magnetisches Feld gebracht wird, so kann man mittels sehr empfindlicher Spektroskope nachweisen, daſs der Charakter der von der Flamme ausgesandten Schwingungen durch das magnetische Feld verändert wird. Die gewöhnliche Natriumflamme sendet (344) ein gelbes Licht aus, das bei schwacher spektraler Zerlegung als eine einfache, bei stärkerer Zerlegung als eine Doppellinie erscheint. Im magnetischen Felde erfährt jede dieser Linien eine Spaltung und zugleich hört das Licht, aus dem sie gebildet werden, auf, natürliches, unpolarisirtes Licht zu sein. Untersucht man das Licht, das die Natriumflamme in Richtung der magnetischen Kraftlinien aussendet, so zeigt sich jede Linie in zwei Linien gespalten, von denen die eine aus rechts herum, die andere aus links herum kreisförmig polarisirtem Licht besteht. Senkrecht zu den Kraftlinien aber erscheint jede Spektrallinie in drei Teile zerlegt, welche geradlinig polarisirt sind, und zwar schwingen die beiden äuſseren Anteile senkrecht, der mittlere parallel zur Richtung der Kraftlinien. Man kann diesen Einfluſs des Magnetfeldes auf die Lichtschwingungen folgendermaſsen darstellen: Die Teilchen, welche das Licht des leuchtenden Dampfes aussenden, führen Schwingungen nach allen möglichen Richtungen aus. Denken wir uns alle diese Schwingungen zerlegt in solche, welche den Kraftlinien parallel und solche, welche zu ihnen senkrecht sind, so werden die ersteren vom Magnetfeld nicht beeinfluſst, die letzteren aber in zwei entgegengesetzte kreisförmige Schwingungen zerlegt, von denen die eine ein wenig beschleunigt, die andere um ebensoviel verzögert wird, so daſs zwei Strahlen von etwas verschiedener Schwingungsdauer entstehen, die bei der spektralen Zerlegung zu einer Doppellinie auseinander treten. Die gröſsere Schwingungszahl erhält dabei derjenige Strahl, dessen Kreisschwingung im Sinne der das magnetische Feld erzeugenden Ströme vollzogen wird, die kleinere derjenige, dessen Schwingung diesem Sinne entgegen gerichtet ist.

370. **Weitere Beziehungen zwischen elektrischen und Lichterscheinungen.** Durchsichtige nichtleitende (dielektrische) Körper, sowohl feste als flüssige, zwischen zwei entgegengesetzt elektrisch geladene Pole gebracht, werden doppelbrechend (Kerr, 1875 vgl. 185), wie der folgende Versuch beweist. In einem mit Schwefelkohlenstoff gefüllten parallelwandigen Glastrog stehen sich in horizontaler Linie zwei Metallkugeln gegenüber, die mit den Elektroden einer Influenzmaschine verbunden sind. Zwischen denselben geht ein von einem Nicol kommender polarisirter Lichtstrahl durch, dessen Schwingungsebene unter 45° zur Horizontalen geneigt ist; derselbe wird durch einen zweiten Nicol, dessen Schwingungsebene mit jener des ersten gekreuzt ist, ausgelöscht, solange die beiden Kugeln unelektrisch sind. Wird aber die Maschine erregt, so zeigt sich auf dem Schirm, auf welchen man mittels einer Linse das Bild des Trogs projizirt hat, der Raum zwischen den Kugeln wieder hell, weil die vom polarisirenden Nicol kommenden Schwingungen parallel und senkrecht zur Verbindungslinie der beiden Pole zerlegt werden, wie bei Glas, das in dieser Richtung gedrückt oder gestreckt wird, und zwar zeigen einige Flüssigkeiten, darunter Schwefelkohlenstoff, denjenigen Charakter der Doppelbrechung, welcher dem gestreckten Glase zukommt (positive Doppelbrechung), während andere Flüssigkeiten die dem gepreſsten Glase eigentümliche (negative) Doppelbrechung annehmen.

Während in diesem Falle die Beziehung zwischen Luft und Elektricität eine indirekte ist, indem das isolirende Mittel im elektrischen Felde durch die dielektrische Polarisation eine andere innere Struktur annimmt, die sich in der Doppelbrechung verrät, scheint in einer anderen Klasse von Erscheinungen eine direkte Beeinflussung des elektrischen Entladungsvorganges durch die Lichtschwingungen vorzuliegen. Entfernt man die kugelförmigen Elektroden eines Funkeninduktors oder einer Influenzmaschine so weit voneinander, daſs eben keine Funken mehr überspringen, so treten die Entladungen sofort wieder ein, wenn man die negative Elektrode durch Licht beleuchtet, welches, wie das elektrische Bogenlicht und das Magnesiumlicht, reich ist an Strahlen kurzer Wellenlänge, insbesondere an ultravioletten Strahlen (Hertz, 1887). Diese Beeinflussung der Funkenentladung steht in engem Zusammenhange mit einem Einflusse des Lichts auf statische Ladungen. Wird eine gut abgeschmirgelte Zinkplatte isolirt aufgestellt und negativ geladen, so verliert sie, wie man an einem mit ihr verbundenen Goldblattelektroskop erkennen kann, ihre Ladung binnen kurzem, wenn sie mit ultraviolettem Licht bestrahlt wird; eine positive Ladung dagegen behält sie auch während der Bestrahlung unverändert bei (Hallwachs, 1889). Der Versuch wird noch empfindlicher, wenn man statt der Zinkplatte Natriumamalgam benutzt, das sich in einer nahezu luftleer gemachten Glaskugel befindet (Elster und Geitel). In die Wand der Glaskugel sind zwei Platinelektroden eingeschmolzen, deren eine von dem Amalgam bedeckt ist. Man verbindet diese durch Drähte mit einem Goldblattelektroskop und mit dem negativen Pol einer Zambonischen Säule, die andere Elektrode mit deren positivem Pol und zugleich mit der Erde. Das Amalgam und das damit verbundene Elektroskop ist alsdann mit negativer Elektricität geladen und die Goldblättchen geben einen Ausschlag, solange die Kugel beschattet ist; sie fallen aber zusammen, sobald man die Amalgamfläche mit elektrischem, Sonnen- oder auch nur mit hellem Tageslicht beleuchtet, divergiren aber bei Beschattung sofort wieder. Man bezeichnet diese Erscheinungen als lichtelektrische Entladung.

Da hiernach die Bestrahlung den Weggang der negativen Elektricität von einem Leiter veranlaſst oder begünstigt, so muſs ein isolirter unelektrischer Leiter durch Beleuchtung mit Strahlen von hoher Brechbarkeit positive Ladung annehmen. (Lichtelektrische Erregung.)

In jüngster Zeit hat Lenard durch Versuche über lichtelektrische Entladung in einem möglichst hohen Vacuum nachgewiesen, daſs bei diesen Vorgängen die negative Elektricität die bestrahlte Oberfläche in Form von negativ geladenen kleinen Teilchen verläſst, denen die gleichen Merkmale zukommen, wie den Teilchen, aus denen die Kathodenstrahlen bestehen.

371. **Hertzsche Versuche. Elektromagnetische Lichttheorie.** Daſs zwischen Licht und Elektricität eine Beziehung ganz prinzipieller grundlegender Natur bestehen müsse, darauf deutete vor allem der

Umstand hin, dafs in dem Verhältnis der verschiedenen elektrischen Mafse eine Geschwindigkeitsgröfse eine Rolle spielt, die ihrem absoluten Betrage nach gleich der Lichtgeschwindigkeit ist (S. 392). Hiervon ausgehend hat Maxwell eine Theorie entwickelt, nach der elektrische Schwingungen sich mit der Geschwindigkeit des Lichts durch den Raum hindurch fortpflanzen und Lichtschwingungen nichts anderes als elektrische Schwingungen sehr kleiner Schwingungsdauer sein sollen. Diese Theorie hat ihre experimentelle Bestätigung in den Versuchen von Heinrich Hertz (1888) erfahren, dem es gelang (282), elektrische Schwingungen von so kurzer Schwingungsdauer herzustellen, dafs ihnen Wellen von bequem mefsbarer Länge entsprachen. Wenn sich nämlich die elektrischen Schwingungen mit der Lichtgeschwindigkeit fortpflanzen, so würden Schwingungen von der Art, wie sie von Feddersen untersucht worden sind (282), mit einer Schwingungsdauer von einer Milliontel Sekunde, Wellen erzeugen, deren Länge nach der Formel $\lambda = V.T$ (284) 300 m betragen würden. Die von Hertz benutzten Erreger elektrischer Schwingungen aber, deren Schwingungsdauer sich aus den viel kleineren Werten ihrer Kapacität und ihrer Selbstinduktion zu einhundert milliontel Sekunden berechnen läfst, würden Wellen von 3 m Länge aussenden. Dafs dies in der That der Fall war, konnte Hertz durch folgenden Versuch beweisen. Dem Erreger der elektrischen Schwingungen, dem Oscillator, stellte er in gröfserer Entfernung eine metallene Wand gegenüber und untersuchte mit einem auf den Oscillator abgestimmten Resonator mit kleiner Funkenstrecke, wie die Wirkung zwischen dem Oscillator und der Wand beschaffen war. Er fand in unmittelbarer Nähe der Wand keine Funken im Resonator; entfernte er ihn aber von der Wand gegen den primären Leiter hin, so traten Funken auf, welche bei einem bestimmten Abstand ihre gröfste Lebhaftigkeit erreichten; dann nahmen bei weiterer Entfernung die Funken an Stärke wieder ab, verschwanden ganz beim doppelten Abstande, wuchsen zu einem abermaligen Maximum an bei dreifachem Abstande u. s. f. Dieser Versuch zeigt, dafs die induzirende Wirkung sich wellenartig durch den Raum fortpflanzt, und mithin zur Fortpflanzung Zeit braucht; denn nur so wird verständlich, dafs sich zwischen der Wand und dem primären Leiter durch Interferenz der einfallenden und der zurückgeworfenen Welle ein Zustand mit Ruhepunkten oder Knoten und regelmäfsig damit abwechselnden Stellen lebhaftester Bewegung oder Bäuchen, mit einem Worte eine stehende Wellenbewegung (286), ausbilden kann, ebenso wie bei der Reflexion von Schall- und Lichtwellen. Da sich die halbe Wellenlänge als Abstand zweier benachbarter Knotenpunkte ergibt und die Schwingungsdauer (und darum auch die Schwingungszahl) aus den Dimensionen des primären Leiters sich berechnen läfst, so findet man die Fortpflanzungsgeschwindigkeit als Produkt der Wellenlänge mit der Schwingungszahl, und zwar zu 300000 km/sec. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit dieser „Strahlen elektrischer Kraft“ ist also gleich derjenigen der Lichtstrahlen.

Wir bringen nun den primären Leiter oder Oscillator seiner Längsrichtung nach in die Brennlinie eines grofsen cylindrischen Hohlspiegels aus Zinkblech; der Induktionsapparat steht hinter dem Spiegel und die Zuleitungsdrähte gehen isolirt durch dessen Wandung. Der ebenfalls geradlinige sekundäre Leiter oder Resonator wird in die Brennlinie eines zweiten dem ersten gleichen Hohlspiegels gebracht, so dafs die beiden zur Funkenstrecke führenden Drähte den Spiegel isolirt durchsetzen und die Funkenstrecke zur bequemeren Beobachtung hinter den Spiegel zu liegen kommt. Stehen die beiden Hohlspiegel einander gerade gegenüber (in einer Entfernung von 6—10 m), so sieht man an dieser Unterbrechungsstelle des sekundären Leiters zwischen einer Kugel und einer Spitze sehr kleine Fünkchen übergehen, welche aber sofort erlöschen, wenn man den zweiten Hohlspiegel etwas zur Seite dreht. Daraus geht hervor, dafs die von dem primären Leiter ausgehenden elektrischen Strahlen ganz ebenso wie Lichtstrahlen an dem ersten Spiegel parallel unter sich zurückgeworfen und in der Brennlinie des zweiten wieder gesammelt werden, wenn die optischen Achsen der beiden Spiegel zusammenfallen. Die Fünkchen erlöschen auch, wenn man zwischen die einander zugekehrten Hohlspiegel einen Schirm aus leitendem Material bringt; nichtleitende (dielektrische) Körper dagegen halten die Strahlen nicht auf: durch Wände, Thüren u. dgl. gehen sie durch.

Dafs die elektrischen Strahlen aus Transversalschwingungen parallel zur Längsrichtung des Oscillators gebildet und sonach im Sinne der Optik geradlinig polarisirt sind, ist schon aus der Art ihrer Entstehung unmittelbar ersichtlich, wird aber durch folgende Versuche noch besonders erwiesen. Dreht man den empfangenden Spiegel um das Strahlenbündel als Achse, bis seine Brennlinie zu der des ersteren senkrecht steht, so werden die sekundären Funken allmählich schwächer und verschwinden bei gekreuzter Lage ganz. Die beiden Spiegel verhalten sich also wie Polarisator und Analysator. Man bringe ferner einen mit parallelen Kupferdrähten bespannten Holzrahmen senkrecht zum Strahlenbündel zwischen die beiden Spiegel, deren Brennlinien parallel stehen. Liegen die Drähte senkrecht zu den Brennlinien, so beeinträchtigt der Rahmen die sekundären Funken so gut wie gar nicht, er hält aber die Strahlen vollkommen auf, wenn seine Drähte den Brennlinien parallel laufen. Der Drahtschirm verhält sich also ähnlich wie eine Turmalinplatte gegen einen geradlinig polarisirten Lichtstrahl.

Um die Brechung der elektrischen Strahlen beim Übergang aus Luft in ein anderes dielektrisches Mittel nachzuweisen, brachte Hertz ein grofses Prisma aus Hartpech (1,5 m hoch, 600 kg schwer) zwischen die beiden Hohlspiegel; der zweite Hohlspiegel mufste alsdann in eine bestimmte Lage nach seitwärts gedreht werden, damit sekundäre Fünkchen auftraten, woraus hervorgeht, dafs das vom ersten Spiegel kommende elektrische Strahlenbündel durch das Prisma abgelenkt wurde.

Da die äufserst kleinen Fünkchen nur in nächster Nähe sichtbar sind, benutzen wir, um die Wirkungen elektrischer Schwingungen einem gröfseren Kreise wahrnehmbar zu machen, die von Branly (1891) entdeckte Thatsache, dafs locker aneinander liegende Metallspäne, die den elektrischen Strom schlecht leiten, ihn plötzlich gut leiten, wenn sie von elektrischen Strahlen getroffen werden, und nach Aufhörung der Strahlung leitend bleiben, bis eine kleine Erschütterung sie wieder in ihren anfänglichen schlecht leitenden Zustand zurückführt. Das Metallpulver (Eisenfeilspäne) befindet sich in einer wenige Centimeter langen Glasröhre (*K*, Fig. 422), dem „Kohärer", zwischen zwei als Elektroden dienenden Metallklötzchen, deren mit Klemmen versehene Enden durch eine Leitung, die ein galvanisches Element (*E*, z. B. Daniell) und ein Galvanometer *G* enthält, verbunden sind. Sobald elektrische Strahlen auf den Kohärer treffen, wird das Galvanometer abgelenkt, und kehrt nach leisem Klopfen am Kohärer, welches durch den Anker eines in die Leitung eingeschalteten Elektromagneten selbstthätig bewirkt werden kann, wieder in die Ruhelage zurück. Der Induktor, von dessen Funkenstrecke die Schwingungen ausgehen, ist von einem Kasten aus Zinkblech umgeben, der nur durch ein dem Funken gegenüberstehendes Ansatzrohr das elektrische Strahlenbündel herausdrängen läfst, mit welchem sich nun alle oben erwähnten Versuche anstellen lassen. Zum Nachweis der Brechung genügt ein Prisma aus Paraffin von 10 cm Kantenlänge; eine Paraffinkugel oder eine mit Petroleum gefüllte Flasche wirken koncentrirend wie Linsen. Die Interferenz der elektrischen Wellen kann ähnlich wie beim Schall (305) durch ein Rohr nachgewiesen werden, das sich in zwei Wege teilt, die sich dann wieder zu einer kurzen dem Kohärer zugewendeten Röhre vereinigen. Der eine Weg kann durch Ausziehen einer U-förmigen Röhre, wie bei einer Posaune, verlängert werden; beträgt die Verlängerung 1, 3, 5 . . . halbe Wellenlängen, so bleibt das Galvanometer in Ruhe. —

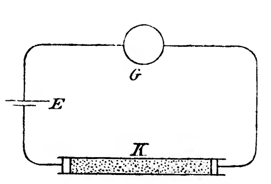


Fig. 422.
Kohärer.

Die „Strahlen elektrischer Kraft" befolgen hiernach dieselben Gesetze der Fortpflanzung, Reflexion und Brechung wie die Lichtstrahlen; es liegt daher nahe, beide als Bewegungen eines und desselben Mittels, des Äthers, anzusehen. Man kann sagen, elektrische Strahlen sind Lichtstrahlen von sehr grofser Wellenlänge, oder Lichtstrahlen sind elektrische Strahlen von sehr kleiner Wellenlänge. Eine bemerkenswerte Beziehung, welche Maxwell aus dieser elektromagnetischen Lichttheorie gezogen hat, nämlich dafs für durchsichtige Nichtleiter die Dielektricitätskonstante gleich dem Quadrate des Brechungsindex ist, hat sich in vielen Fällen bewährt.

Die aufserordentliche Empfindlichkeit des Kohärers hat es später ermöglicht, die elektrischen Wellen auf viel gröfsere Ent-

fernungen hin zu verfolgen, als es Hertz ursprünglich möglich war. Marconi kam dadurch auf den Gedanken, mit Hülfe dieser Wellen durch den Raum hindurch zu telegraphiren (Telegraphie ohne Draht, 1897). Um die Wellen in wirksamer Weise auszusenden und in Entfernungen von 50, 100 oder mehr Kilometer aufzufangen, verband Marconi die eine Hälfte des Oscillators mit der Erde, die andere mit einem an hohem Maste isolirt in die Lüfte geführten Drahte von etwa 30 m Länge. In derselben Weise war an der Empfangsstation der Kohärer einerseits an das Ende eines solchen Auffangedrahtes, andererseits an Erde gelegt. Man bezeichnet diese Drähte als „Antennen“. Der Strom des Kohärerkreises betreibt ein empfindliches Relais, mit dessen Hülfe ein Morse-Apparat in Thätigkeit gesetzt wird, der für jeden Funken auf der Sendestation einen Strich aufschreibt.

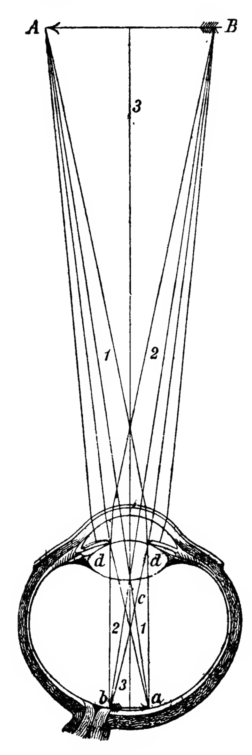


Fig. 423.
Auge.

372. **Das Auge.** Der menschliche Augapfel ist umschlossen von einer derben sehnigen Haut (sclerotica), welche als „das Weiſse im Auge“ sich darstellt; in dieselbe ist vorn ein rundes durchsichtiges Fenster, die gleich einem Uhrglas gewölbte Hornhaut (cornea), eingesetzt. Hinter der Hornhaut ist die Regenbogenhaut (iris), welche die Farbe des Auges bestimmt, wie ein Vorhang ausgespannt, in dessen Mitte das schwarz aussehende runde Sehloch (Pupille) dem Lichte den Durchgang gewährt. Dicht hinter der Pupille befindet sich eine aus vielen durchsichtigen Schichten gebildete Sammellinse, die Krystalllinse *dd* (Fig. 423). Die vordere durch Hornhaut und Krystalllinse abgegrenzte Augenkammer ist mit einer durchsichtigen wässerigen Flüssigkeit ausgefüllt, die gröſsere hintere Augenkammer enthält eine durchsichtige Gallertmasse, den sogen. Glaskörper. Die Innenwand der hinteren Augenkammer ist zunächst von der Aderhaut (Gefäſshaut, choroidea) ausgekleidet, über welche sich wieder die Netzhaut (retina), als Fortsetzung des Sehnerves, ausbreitet. Die Eintrittsstelle des Sehnerves in die Netzhaut ist für Licht unempfindlich, und heiſst deshalb der blinde Fleck. Das Auge wirkt ähnlich wie eine kleine Camera obscura; die Krystalllinse entwirft nämlich auf der Netzhaut kleine umgekehrte Sammelbilder (*a b*) der äuſseren Gegenstände *A B*. Diese Bildchen werden auf kurze Zeit gleichsam photographisch festgehalten, indem ihr Licht auf den Sehpurpur (Boll, Kühne, 1876), einen die lebende Netzhaut rot färbenden lichtempfindlichen Farbstoff,

zersetzend wirkt, verschwinden aber bald wieder, weil dieser Farbstoff durch die Lebensthätigkeit immer wieder erneuert wird. Durch den Sehnerv werden die empfangenen Eindrücke dem Gehirn als dem Sitz des Bewufstseins zugeführt. Fast in der Mitte der Netzhaut liegt der gelbe Fleck und inmitten desselben das Netzhautgrübchen. Nur der auf den gelben Fleck fallende Teil des Netzhautbildes wird scharf, alle übrigen Teile aber um so undeutlicher gesehen, je weiter sie von dem Netzhautgrübchen entfernt sind. Die Verbindungslinie der Netzhautgrube mit der Mitte der Hornhaut heifst die Augenachse (Sehachse); damit das Bild eines Punktes auf die Netzhautgrube falle und sonach deutlich gesehen werde, mufs die Augenachse oder Gesichtslinie auf den Punkt gerichtet sein. Jede gerade Linie ($aA$, $bB$), welche einen Punkt des Netzhautbildes mit dem zugehörigen Punkte des Gegenstandes verbindet, wird Richtungslinie genannt. Alle Richtungslinien schneiden sich fast genau in einem Punkt, welcher auf der Augenachse nahe vor der Hinterfläche der Krystalllinse liegt, dem Kreuzungspunkt, in welchem die Haupt- und Knotenpunkte des von den brechenden Medien des Auges gebildeten Linsensystems nahezu zusammenfallen. Der Winkel, welchen die nach den äufsersten Punkten ($A$ und $B$) des Gegenstandes gezogenen Richtungslinien miteinander bilden, heifst der Sehwinkel; durch ihn ist die Gröfse des Netzhautbildes und sonach die scheinbare Grösse des Gegenstandes bedingt.

373. **Reduzirtes Auge.** Nach Listing (1845) kann das wirkliche Auge hinsichtlich seiner Wirkung auf eine einzige brechende Fläche zurückgeführt werden, welche bei einem Brechungskoëfficienten von 1,34 einen Krümmungsradius von 5,1 mm hat, deren Scheitel um 2,3 mm hinter dem Scheitel der Hornhaut liegt, deren zweite Brennweite (die Entfernung der Netzhautmitte vom Scheitel) 20,1 mm und deren erste (vordere) Brennweite 15,0 mm beträgt. Der Krümmungsmittelpunkt dieses reduzirten Auges entspricht sehr nahe dem Kreuzungspunkt der Strahlen im wirklichen Auge.

374. **Accommodation.** Ein regelrecht stehendes (emmetropisches) Auge ist so eingerichtet, dafs es im Zustand der Ruhe die Bilder sehr weit entfernter (unendlich ferner) Gegenstände (z. B. der Sterne) auf der Netzhaut entwirft. Es kann sich aber, indem durch die Thätigkeit eines gewissen Muskels die Krystalllinse stärker gewölbt und etwas nach vorn geschoben wird, auch für geringere Entfernungen einrichten (accommodiren); der nächste Punkt, für welchen dies noch möglich ist, der Nahepunkt, ist etwa 10—15 cm vom Auge entfernt. Beim kurzsichtigen (myopischen) Auge ist die Augenachse von vorn nach hinten zu lang; Strahlen, die von einem entfernten Punkt kommen, vereinigen sich daher schon vor der Netzhaut und geben auf dieser statt eines scharfen Bildpunktes einen verschwommenen Zerstreuungskreis; der entfernteste Punkt, für welchen sich ein solches Auge noch einzurichten vermag, heifst sein Fernpunkt. Augen, deren Achsen von vorn nach hinten zu kurz sind, heifsen übersichtig (hypermetropisch); sie würden Strahlen, die von weit entfernten Punkten kommen, erst hinter der

Netzhaut vereinigen und erzeugen daher ebenfalls auf dieser einen Zerstreuungskreis; dagegen sind sie im stande, konvergirend einfallende Strahlen auf der Netzhaut zu vereinigen. Diese Fehler werden durch die Brillen beseitigt: das kurzsichtige Auge wird durch eine Hohllinse, welche die Strahlen mehr auseinander lenkt, zum Sehen in die Ferne befähigt; das übersichtige Auge mufs, um in die Ferne zu sehen, mit einer Sammellinse bewaffnet werden, welche die Strahlen zusammendrängt. Im Alter können alle drei Arten von Augen durch Erschlaffung der Muskeln ihr Anpassungsvermögen für nahe gelegene Gegenstände verlieren und weitsichtig (presbyopisch) werden, sodafs alsdann selbst ein regelrecht gebautes Auge zum Sehen in der Nähe einer Sammellinse bedarf. Die Strecke zwischen dem Nahepunkt und Fernpunkt, welch letzterer bei dem regelrechten Auge in unendlicher Entfernung liegt, nennt man das Accommodationsgebiet. Innerhalb desselben liegt der Punkt, dessen Abstand vom Auge Sehweite genannt wird; man versteht darunter die Entfernung, in welcher man gewöhnliche Druckschrift am bequemsten zu lesen vermag. Sie beträgt für ein normales Auge etwa 25 cm.

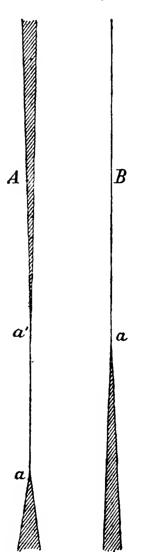


Fig. 424. Messung der Sehweite.

Will man die Grenzen seines deutlichen Sehens bestimmen, so befestige man das eine Ende eines weifsen Fadens oben an einem schwarzen Hintergrund, lege das andere Ende des Fadens an das untere Augenlid, und blicke mit diesem Auge an dem gespannten Faden entlang. Je nachdem das Auge kurz- oder weitsichtig ist, erblickt es den Faden in der Form *A* oder *B* (Fig. 424). Zunächst am Auge bei *o* erscheint der Faden am breitesten und unbestimmtesten, läuft dann immer schmäler zu, bis er an der Stelle *a*, die man leicht mit dem Finger bezeichnen kann, am schmalsten nnd deutlichsten erscheint. Bei Kurzsichtigen läuft er von *a* (Nahepunkt) bis *a'* (Fernpunkt) schmal und deutlich fort (*A*); bei Weitsichtigen (*B*) aber erscheint er von *a* an bis ans Ende schmal und deutlich (Ohm).

Betrachtet man einen schmalen Gegenstand, z. B. eine Stecknadel, durch zwei kleine Öffnungen, deren Abstand geringer ist als der Durchmesser der Pupille, so erscheint er nur dann einfach, wenn das Auge auf ihn accommodirt ist; in jeder anderen Entfernung erscheint er doppelt, weil die durch die beiden Öffnungen dringenden Strahlenbündel sich entweder vor oder hinter der Netzhaut schneiden (Scheiner, 1619). Man kann diesen Versuch auch mittels einer Linse, vor der sich zwei Spalte befinden, objektiv anstellen.

375. **Sehen mit zwei Augen.** Damit man einen Punkt mit den zwei Augen dennoch einfach sehe, ist erforderlich, dass die von ihm durch die Knotenpunkte der beiden Augen gehenden Linien entweder die Netzhautgruben selbst oder doch entsprechende

(korrespondirende identische) Punkte der beiden Netzhäute treffen, d. h. solche Punkte, welche gleichweit von den beiden Netzhautgruben nach derselben Seite hin liegen. Durch das Sehen mit zwei Augen (binokulares Sehen) werden wir in der Beurteilung der Entfernung naher Gegenstände wesentlich unterstützt. Mit dem rechten Auge sehen wir nämlich einen nahen Gegenstand vor einer anderen Stelle des Hintergrundes als mit dem linken, und diese Stellen rücken um so weiter auseinander, je näher der Gegenstand ist. Durch lange Übung haben wir gelernt, aus diesem Unterschied unbewufst auf die Entfernung des Gegenstandes zu schliefsen. Wenn man das eine Auge schliefst, ist es darum sehr schwierig, eine Nähnadel einzufädeln oder den gestreckten Armes vorgehaltenen nach aufwärts gerichteten Zeigefinger mit dem anderen Zeigefinger von oben herab zu treffen. Es gelingt dies aber leicht, wenn man mit beiden Augen sieht.

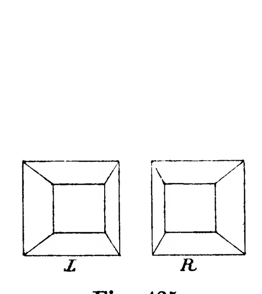



Fig. 425.
Stereoskopische Bilder einer abgestumpften Pyramide.

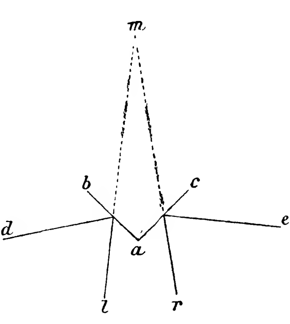



Fig. 426.
Wheatstones Stereoskop.

376. **Stereoskop.** Das Sehen mit zwei Augen hat ferner den Vorteil, dafs die Gegenstände nicht als flächenhafte Bilder, wie nur ein Auge sie zeigen würde, sondern körperlich gesehen werden. Mit dem rechten Auge sieht man einen körperlichen Gegenstand (z. B. eine abgestumpfte Pyramide, Fig. 425) etwas mehr von der rechten (*R*), mit dem linken etwas mehr von der linken Seite (*L*); indem diese beiden Bilder in unserem Bewufstsein zu einem Gesamteindruck verschmelzen, erhalten wir den Eindruck der Körperlichkeit des Gegenstandes. Bietet man daher jedem Auge eine auf einer Fläche ausgeführte Zeichnung dar, welche einen Körper dargestellt, wie er sich in dem betreffenden Auge abgebildet haben würde, und sorgt dafür, dass die Bildchen beider Zeichnungen auf entsprechende Stellen der beiden Netzhäute fallen, so müssen sich die beiden Eindrücke zu demselben körperlichen Gesamteindruck vereinigen, den der dargestellte Gegenstand bei unmittelbarer Betrachtung hervorgebracht hätte. Wheatstone erreichte diese Vereinigung durch sein Spiegelstereoskop (Fig. 426). Dasselbe besteht aus zwei rechtwinklig zu

einander gestellten Spiegeln *ab* und *ac*. Der Beobachter schaut mit dem linken Auge *l* in den linken, mit dem rechten Auge *r* in den rechten Spiegel. Seitlich bei *d* und *e* sind die für das linke und das rechte Auge bestimmten Zeichnungen eines Gegenstandes aufgestellt. Durch die Spiegel werden nun die von zusammengehörigen Punkten der beiden Zeichnungen ausgehenden Strahlen so zurückgeworfen, dafs sie von einem einzigen hinter den Spiegeln gelegenen Punkt *m* zu kommen scheinen, und fallen daher auf entsprechende Stellen der Netzhäute, und der Beschauer erhält den Eindruck, als ob sich daselbst der Gegenstand körperlich befände. Bequemer und daher allgemein verbreitet ist das Brewstersche Linsenstereoskop (Fig. 427). Die beiden Halblinsen *A* und *B* sind, mit ihren dicken, Teilen nach auswärts gewendet, in die obere Fläche eines Kästchens eingesetzt, an dessen Boden die beiden auf einen Karton nebeneinander geklebten Ansichten *aa'* und *bb'* ein und desselben Gegenstandes eingeschoben werden. Diese beiden Ansichten erhält man durch photographische Aufnahme des Gegenstandes von zwei etwas verschiedenen Standpunkten, wobei die Camera obscura des Photographen die Rolle des linken und des rechten Auges spielt. Aus der Figur ist ersichtlich, wie durch die Brechung des Lichts in den Halblinsen die beiden Ansichten zur Deckung gebracht und dadurch zu einem körperlichen Eindruck verschmolzen werden. Indem man die Photographie dem Stereoskop dienstbar machte, ist es gelungen, Statuen, Baudenkmäler, Ansichten aller Art mit schlagender Naturwahrheit zu plastischer Anschauung zu bringen.

Bringt man im Wheatstoneschen Spiegelstereoskop in den Punkten *d* und *e* Spiegel an, welche den Spiegeln *ba* und *ca* parallel sind, so sieht man einen entfernten Gegenstand, z. B. eine Landschaft, im Punkte *m* mit den beiden Augen so, wie sie von zwei Augen gesehen würde, die den viel grösseren Abstand *de* hätten; da die Tiefenwahrnehmung, das Erkennen des Hintereinander in der Landschaft, von der Verschiedenheit der beiden Bilder unserer Augen, also von dem Augenabstand abhängt, so erscheint die Tiefenwahrnehmung bei Benutzung des beschriebenen Instrumentes bedeutend verstärkt (Helmholtz, Telestereoskop, 1857). In den Doppelfernrohren der Firma Zeifs (335) ist dieser Gedanke verwirklicht worden; bei einer besonderen Art dieser Fernrohre sind die die Bildumkehrung bewirkenden Spiegel auseinander gerückt; die beiden Objektive haben einen beträchtlich gröfseren Abstand als die beiden Oculare und die Plastik der Landschaft erscheint in diesen Fernrohren in verstärkter Form (Relieffernrohre). Da bei dieser Art der Bildumkehrung die Objektive ein reelles Bild des betrachteten Gegenstandes entwerfen, kann man im Fernrohre am Ort dieses Bildes auch noch eine auf Glas geteilte Skala befestigen, und dieselbe für jedes Auge so einrichten, dafs beim Sehen mit beiden Augen das gemeinsame stereoskopische Bild der Skala als eine Folge von Marken erscheint, die sich vom Beobachter fort in die

Landschaft hinein erstrecken und an denen man die Entfernungen in der Landschaft unmittelbar ablesen kann (Stereoskopischer Entfernungsmesser, 1899).

377. **Dauer des Lichteindrucks.** Der Lichteindruck im Auge braucht einige Zeit, um zu stande zu kommen und um wieder zu verschwinden (etwa $^1/_7$ Sekunde). Eine dahinfliegende Flintenkugel wird nicht gesehen. Wird ein glimmender Span im Kreise geschwungen, so sieht man einen geschlossenen feurigen Kreis. Die Speichen eines rasch umlaufenden Rads lassen sich nicht unterscheiden, und die Oberfläche einer mit schwarzen und weifsen Sektoren bemalten Scheibe erscheint gleichmässig grau, wenn sie auf der Schwungmaschine in rasche Umdrehung versetzt ist. Sind die Sektoren mit Farben be-

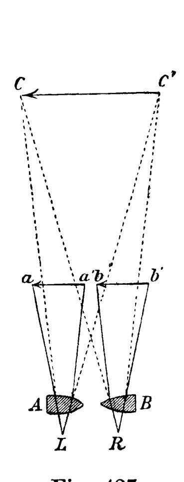



Fig. 427.
Brewsters Stereoskop.

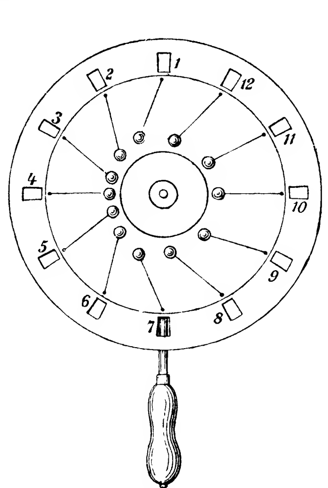



Fig. 428.
Stroboskopische Scheibe.

malt, so lagern sich bei raschem Drehen die Eindrücke über einander und es entstehen Mischfarben. Sind die Farben z. B. der vollständigen Reihe der Spektralfarben möglichst ähnlich, so erscheint die Scheibe bei rascher Umdrehung grauweifs (Farbenkreisel). Dreht man eine Scheibe mittels zweier an die Enden eines Durchmessers geknüpfter Fäden rasch um diesen Durchmesser, so dafs man abwechselnd die eine und die andere Seite sieht, so sieht man die auf beiden Seiten angebrachten Zeichnungen gleichzeitig, also z. B. ein schwarzes Kreuz, wenn ein schwarzer Streifen auf der einen Seite in der Richtung der Fäden, auf der anderen senkrecht dazu gezogen ist; oder ist auf die eine Seite ein Käfig, auf die andere ein Vogel gemalt, so erscheint bei rascher Drehung der Vogel im Käfig (Thaumatrop).

378. **Das Stroboskop** (Phänakistoskop, Phantoskop, Wunderscheibe) besteht aus einer Scheibe von Pappe, (Fig. 428), an deren Umfang eine Anzahl Löcher, z. B. zwölf, angebracht sind. Auf dieser Scheibe ist eine zweite kleinere befestigt, auf welcher irgend ein Gegenstand, z. B. ein Pendel, in so viel aufeinander folgenden Stellungen, als Löcher vorhanden sind, dargestellt ist. Kehrt man nun diese Vorrichtung mit der bemalten Seite einem Spiegel zu und blickt durch eine der Öffnungen, z. B. die oberste, in den Spiegel, während die Scheibe in rasche Drehung versetzt wird, so gewahrt man, indem eine Öffnung nach der anderen am Auge vorübergeht, unter der jedesmal obersten Öffnung ein Bild nach dem anderen, aber jedes folgende so schnell nach dem vorhergehenden, dafs der Eindruck, den dieses im Auge hervorgebracht hat, fortbesteht, bis der folgende Eindruck an seine Stelle tritt. Indem so die Bilder der aufeinander folgenden Stellungen ineinander übergehen, glaubt man unter der obersten Öffnung ein Pendel schwingen zu sehen; da jedes Bild der Scheibe ebenso durch die ihm folgenden abgelöst wird, so sieht man nicht nur das oberste, sondern sämtliche Pendelbilder in schwingender Bewegung, und da jedes Pendel etwas später durch seine Gleichgewichtslage hindurchgeht als das vorhergehende, so erhält man den Eindruck einer durch die Reihe der Pendel sich fortpflanzenden Wellenbewegung. Man kann diese Erscheinung einer gröfseren Anzahl von Beobachtern gleichzeitig sichtbar machen, wenn man ein gegen die Hinterseite der Scheibe gelenktes helles Lichtbündel (Sonnenlicht, elektrisches oder Drummondsches Licht) durch eine Linse auf einem der Löcher ihres Randes sammelt und den aus der Öffnung tretenden Strahlenkegel durch einen kleinen Spiegel auf die Vorderseite der Scheibe zurückwirft. Eine andere Form des Phänakistoskops ist der stroboskopische Cylinder oder die Wundertrommel (Lebensrad, Zootrop, Dädaleum, Fig. 429). Ein um seine lotrecht stehende Achse drehbarer, oben offener Cylinder von Pappe ist nahe seinem oberen Rande mit zwölf Schlitzen versehen; zwölf Bilder eines bewegten Gegenstandes in zwölf aufeinander folgenden Stellungen sind auf einem Papierstreifen dargestellt, den man in den Cylinder unter den Schlitzen so hineinbringt, dafs er sich der Wandung ringsum anschmiegt. Diese Einrichtung macht den Spiegel entbehrlich und hat den Vorzug, dafs mehrere Personen zugleich von verschiedenen Seiten durch die Schlitze hineinsehen und die Bilderstreifen rasch gewechselt werden können. Da sich auf diese Weise nicht nur Wellenbewegungen veranschaulichen, sondern auch durch Momentphotographie in ihren aufeinander folgenden Phasen aufgenommene Bewegungen von Menschen und Tieren sehr täuschend darstellen lassen, so ist das Stroboskop, namentlich in

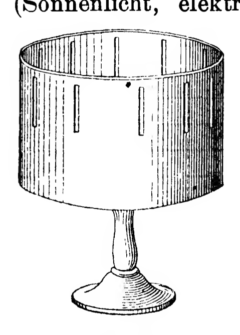


Fig. 429.
Stroboskopischer Cylinder.

seiner letzteren Form, ein beliebtes Spielzeug. Durch den Kinematographen werden die Momentbilder in rascher Aufeinanderfolge auf einen Schirm projizirt.

379. **Farbenempfindung.** Obwohl die einfachen Farben an und für sich mit den einfachen Tönen vergleichbar sind, so ist doch die Art unserer Farbenempfindung von unserer Tonempfindung durchaus verschieden. Die aufsteigende Reihe der Töne bildet für unser Ohr eine in gleicher Weise aufsteigende Reihe von Tonempfindungen, in der der stetig anwachsenden Schwingungszahl die stetig ansteigende Tonhöhe entspricht. Das Spektrum bildet in seiner Ausdehnung vom Rot zum Violett eine ganz ähnliche Folge von Schwingungen mit stetig ansteigender Schwingungszahl. Aber die zugehörigen Empfindungen bilden keine entsprechende gleichartige Reihe. Vielmehr treten vier Hauptfarben im Spektrum hervor: rot, gelb, grün, blau, die wir als einfache Farben empfinden, während die dazwischen liegenden Stellen des Spektrums den Eindruck von Mischfarben machen (orange, gelbgrün, blaugrün) und stetige Übergänge von einer Farbe zur nächsten bilden. Aufserdem aber giebt es für unsere Farbenempfindung einen stetigen Übergang vom violetten Ende des Spektrums durch Purpur hindurch zum roten Ende, so dafs die Empfindungen der reinen satten Farben, wie sie den Spektralfarben und dem Purpur zukommen, sich auf einer geschlossenen Linie, etwa einem Kreise, als eine durch stetige Übergänge verbundene Folge anordnen lassen. Von jeder dieser Farben giebt es ferner durch eine Folge von ungesättigten Farben einen Übergang zu Weifs (z. B. rosa, gelbliche, grünliche, bläuliche Farbentöne), und durch allmähliche Abstufung der Intensität einen Übergang bis zu Schwarz, und endlich zwischen Schwarz und Weifs alle möglichen Übergänge durch Grau hindurch. Jede dieser Abarten unserer Farbenempfindung läfst sich in unserem Auge nicht blofs durch eine, sondern durch viele verschiedenartige Zusammensetzungen von Lichtschwingungen hervorrufen, ohne dafs unser Auge im stande wäre, die zusammenwirkenden Teile dieser Mischung herauszuerkennen. Während das Ohr aus einem Tongemisch dessen einfache Bestandteile heraushört und aus verschiedenen Tönen gemischte Klänge sofort als verschieden erkennt, kann das Auge das Weifs, das z. B. aus der Mischung von einfachem Blau mit dem komplementären einfachen Gelb entsteht, nicht von dem Weifs unterscheiden, das aus drei oder mehr oder aus allen Spektralfarben gemischt ist. Die Erfahrung lehrt, dafs man jede Farbennüance durch eine Mischung einer der satten Farben mit Weifs herstellen kann. Da nun das Weifs stets aus zwei satten Farben gemischt werden kann, so lassen sich ganz allgemein alle Farbentöne durch Mischung von drei satten Farben herstellen. Die Willkür, die auch hierbei noch in der Wahl der drei Farben liegt, kann man endlich beseitigen, indem man drei bestimmte, passend gewählte einfache Farben (Grundfarben) allen Farbenmischungen zu Grunde legt. Ein Apparat, der gestattet, die natürlichen Farben der

Körper durch Mischung aus drei Grundfarben wiederzugeben, ist das Chromoskop von Ives. Von einem Gegenstande werden auf orthochromatischen Platten (351) drei photographische Aufnahmen gemacht, die eine durch ein rotes, die zweite durch ein grünes, die dritte durch ein blauviolettes Glas hindurch. Die auf Glas hergestellten, farblosen Positive dieser Aufnahmen werden dann wieder durch ein rotes, grünes, blaues Glas hindurch entweder direkt betrachtet und durch Spiegelung an Glasplatten zu einem Bilde vereinigt, oder sie werden nach Art der Bilder eines Skioptikons (S. 469) durch drei Projectionslinsen auf dieselbe Stelle eines weifsen Schirmes geworfen und lagern sich dort übereinander. Infolge der Aufnahmen durch die passend gewählten Lichtfilter hindurch enthält jedes Bild die entsprechende Grundfarbe in denjenigen Abstufungen, in denen sie in den natürlichen Farben des Gegenstandes gewissermafsen enthalten ist. Die Zusammensetzung der drei Bilder gibt daher die natürliche Farbe wieder.

Die beschriebenen Thatsachen haben zu der Annahme geführt, dafs die unendlich vielen Strahlenarten des Spektrums in unserem Auge überhaupt nur wenige verschiedene Farbenempfindungen zu erregen im stande sind. Nach der älteren Theorie von Young (1807) und Helmholtz (1867) enthält die Netzhaut drei Arten von Nervenfasern, Rot, Grün, und Violett empfindende, welche von irgend einem homogenen Lichtstrahl stets alle drei, jedoch in verschiedenem Grade, erregt werden. Nach der neueren Theorie von Hering können durch die verschiedenen Lichtarten drei Empfindungspaare erregt werden, Weifs-Schwarz, Rot-Grün, Gelb-Blau, die paarweise derart zu einander im Gegensatz stehen, dafs z. B. bei Weifsempfindung ein gewisser Stoff verbraucht, bei der Schwarzempfindung wieder ersetzt wird.

---

# Namenregister.


Abbe 458, 490.
Abney 510.
Airy 69.
Amici 491.
Amontons 163.
Ampère 299, 331, 347, 349.
Andrews 190.
Arago 125, 328, 372, 382, 405, 538, 555.
Archimedes 97.
Armstrong 257.
Arrhenius 296.
Atwood 8.
August 188.
Auzout 477.
Avogadro 134, 200, 212.
Ayrton 392.

Babinet 129, 526, 529.
Baille 70.
Baily 70.
Balmain 502, 510.
Barlow 345, 346.
Bartholinus 540.
Barton 528.
Beaumé 103.
Beck 103.
Becquerel 367, 369, 502.
Behrens 284, 285.
Bell 383.
Bergmann 278.
Berliner 432.
Bernoulli 211, 416.
Bessel 65.
Biot 333.
Black 166, 196.
Bohnenberger 57, 285.
Boll 569.
Boltzmann 263, 507.
Borda 63.
Bose 255.
Bouty 263.
Boyle 123.
Bradley 443.
Bramah 92.
Branly 567.
Braun, 270.
Breguet 155, 200.
Brewster 448, 539, 572, 573.
Brodhun 442, 459.
Browning 493.
Bunsen 129, 141, 178, 196, 287, 288, 306, 315, 434, 441, 442, 491, 492, 494, 495.

Cagniard-Latour 409.
Cailletet 191.
Canton 108, 237, 278.
Carnot 214.
Carré 183.
Cartesius 132.
Cartier 103.
Cauchy 522.
Cavendish 70.
Celsius 149.
Charles 133, 161.
Children 321.
Chladni 422.
Christiansen 521.
Clamond 326.
Clark 289, 307, 312, 315.
Clarke 371.
Clausius 211, 214, 296.
Clement 201.
Colladon 190, 405.
Columbus 222.
Cornu 70, 444, 486, 517.
Corti 433.
Coulomb 88, 228, 238, 241, 242, 298.
Crookes 365, 366, 367, 508.
Cunaeus 260.
Curie 278, 369.

Dalton 143, 146, 161, 185, 211.
Daniell 186, 287, 288, 306, 307, 312, 315, 567.
Davy 204, 293, 324.
Deprez 346, 377.
Descartes 132, 457.

Desormes 201.
Desprez 202.
Dewar 192, 206.
Döbereiner 147.
Dolivo-Dobrowolsky 379.
Dollond 490.
Doppler 522.
Dove 409.
Draper 505.
Drebbel 148.
Drobisch 69.
Drummond 435, 497, 574.
Du-Bois Reymond 280, 305, 359.
Dubosq 342.
Dufay 235, 256.
Dulong 3, 125, 157, 198, 199.
Dumas 184.
Dutrochet 115.

Edison 322, 375, 432.
Elster 564.
Engelmann 510.
Exner 270, 278.

Fahrenheit 103, 150.
Faraday 168, 252, 257, 263, 264, 291, 295, 297, 336, 350, 358, 382, 562.
Faure 305.
Fechner 285.
Feddersen 387, 388, 565.
Ferraris 379.
Fizeau 444.
Franklin 235, 240, 261, 263, 275, 277.
Franz 203, 309.
Fraunhofer 487, 488, 495, 498, 499, 526, 528.
Fresnel 513, 538, 555, 556.
Foucault 64, 342, 360, 361, 382, 444, 520.
Fourier 429.
Fourneyron 107.

Galilei 8, 16, 60, 63, 148, 478.
Galvani 280.
Garthe 348.
Gassiot 318, 362.
Gaulard 378.
Gaufs 227, 232, 337, 388, 474.
Gay-Lussac 103, 161, 162, 164, 183, 188, 194, 211.
Geifsler 130, 362, 363, 495, 523.
Geitel 564.
Gerson, 438.
Gibbs 378.
Gilbert 222, 234.
Goldstein 367.
Graham 117, 144.
Gramme 372.
Grafsmann 129.
Gray 234.
Gregory 480, 481.
Grimaldi 523.
Grove 286, 306, 315.
Gülcher 326.
Guericke 121, 126, 132, 255.
Guillaume 155.

Hadley 449.
Häcker 221, 222.
Haldat 96.
Halley 223.
Hallwachs 564.
Halske 349, 371, 374.
Hankel 278.
Hann 200.
Hansteen 225.
Hartmann 224.
Hausen 255.
Hefner-Alteneck 342, 343, 373, 442.
Helmholtz 25, 107, 200, 354, 427, 430, 431, 521, 522, 572, 575.
Henley 261, 270, 272.
Henry 145, 355.
Hering 575.
Heron 139.
Hermann 154.
Herschel 480, 502.
Hertz 366, 388, 564, 565, 566, 568.
Hirn 24, 209, 217.
Hittorf 297, 364, 366.
vant' Hoff 164.
Hofmann 183.
Holtz 265.
Hooke 83, 94.
Huggins 523.
Hughes 384.
Humboldt, A. v. 405.
Huygens 65, 514, 517, 518, 524, 541.

Jacobi 298.
Jansen 476.
Jolly 70, 80, 100, 161, 162, 447.
Joule 24, 199, 208, 320, 328, 382.

Kater 64.
Kaufmann 369.
Kayser 495.
Kepler 66, 477, 478, 488.
Kerr 264, 563.
Ketteler 522.
Kienmayer 255.
Kinnersley 273.
Kirchhoff 318, 494, 498.
Kleist 260.
König, R. 416, 426, 429.
Kohlrausch, F. 297, 344, 357, 384, 458.

Kohlrausch, R. 259, 392.
Koppe 187.
Krigar-Menzel 70.
Krönig 211.
Kühne 569.
Kundt 278, 419, 521, 562.

Lallemand 553.
Lamont 278.
Lane 262, 263.
Langley 317, 505, 517.
Laplace 196, 336, 406.
Laurent 559.
Lavoisier 196.
Leclanché 288, 315.
Leibniz 22.
Leidenfrost 178, 190.
Lenard 366, 564.
Lenz 327, 353.
Leslie 183.
Lichtenberg 237, 274, 275.
Linde 192.
Lippershey 478.
Lippmann 532.
Lissajous 424.
Listing 569.
Lockyer 523.
Lodge 388.
Lommel 133, 333, 501, 502, 510, 522.
Lüdtge 384.
Lullin 274.
Lummer 442, 459.

Mach 393.
Malus 538.
Marconi 568.
Marcus 326.
Mariotte 123, 137, 161, 162, 188, 194.
Marum, van 240.
Marx 545.
Maskelyne 70.
Maxwell 265, 392, 565, 567.
Mayer, Rob. 25, 209, 213.
Meidinger 288, 315.
Melde 402.
Melloni 326, 502, 504.
Melsens 277.
Mendelejeff 194.
Meyer, Vict. 184.
Mitscherlich 558.
Mohr 99.
Mohs 78.
Montgolfier 133, 139.
Morse 340, 568.
Mousson 168.

Natterer 189, 190.
Nernst 307, 322, 323.
Neumann 199.
Newton 16, 67, 71, 406, 449, 479, 513, 530.
Nicholson 104.
Nicol 544, 553, 557, 558, 559, 562.
Nobili 300, 326
Noë 326.
Nörremberg 545, 546, 547, 550.
Norman 225.
Nuñez 3.

Oersted 108, 188, 298.
Ohm, G. S. 309, 311, 312, 313, 429, 570.
Olszewski 192.

Pacinotti 372.
Papin 177.
Pascal 95.
Peltier 278, 326.
Pepys 142.
Perrin 366.
Perry 392.
Petit 3, 157, 198, 199.
Petrina 348.
Petroff 90.
Pfeffer 116, 164.
Pfister 154.
Pictet 191.
Pixii 370.
Planté 305.
Plateau 111.
Plücker 362.
Poggendorff 300, 318, 447.
Pohl 290.
Poisson 531.
Porro 479.
Porta 438.
Pouillet 302, 512.
Poynting 70.
Prevost 206.
Prony 90.
Pulfrich 458.

Quincke 73, 426.
Quintenz 48.

Raoult 168, 175.
Real 96.
Réaumur 149.
Regnault 125, 164, 197.
Reich 70.
Reis 383.
Rheita 478.
Richarz 70.
Richer 63.
Richmann 198.
Rieſs 257, 273.
Ritchie 342, 440.
Ritter 284, 291, 304.

Roberval 48.
Römer 443.
Röntgen 367, 369.
Roget 348.
Rose 165.
Roſs 224.
Rosse, Lord 480.
Rowland 526, 528.
Rubens 517.
Ruhmkorff 290, 360.
Rumford 440.
Runge 495.
Rutherford 151.

Saussure 187.
Savart 333, 409, 561.
Scheiner 570.
Schmidt, A. 108.
Schmidt, G. C. 369.
Schott 490.
Schumann 517.
Schweigger 300.
Schwerd 526.
Schyrl 478.
Scott 426.
Seebeck 324, 409.
Segner 106.
Sellmeyer 521.
Serrin 342
Siemens, W. 309, 371, 374.
Six 151.
Smee 287.
Snellius 457.
Soleil 557, 558.
Sprengel 131.
Stefan 205, 507.
Steinheil 339.
Stevin 95.
Stokes 501.
Sturgeon 328.
Sturm 405.
Sulzer 293.
Symmer 235.

Tartini 427.
Taylor 421.
Tesla 388.
Thales 234.
Thomson, J. J. 367, 392.
Thomson, W. 215, 269, 270, 271, 392.
Töpler 265, 268.
Torricelli 105, 119.
Tycho 67.
Tyndall 408.

Vernier 3.
Vinci, L. da 438.
Volta 258, 280, 281, 283, 284, 294.
Voſs 268.

van der Waals 164.
Wagner 340, 361.
Weber, E. H. 395.
Weber, F. 505.
Weber, W. 335, 338, 348, 381, 382, 388, 392, 395.
Wehnelt 361.
Weston 290, 312, 315.
Wheatstone 310, 317, 340, 424, 572, 573.
Wiedemann, E. 502.
Wiedemann, G. 203, 301, 309.
Wien, W. 507.
Wiener 532, 555, 556.
Wild 561.
Wilke 254.
Wimshurst 268.
Winkler 255.
Wollaston 73, 182, 447, 458, 487.
Wood 165.
v. Wroblewski 192.

Young 514, 575.

Zamboni 284.
Zeeman 563.
Zeiſs 479, 572.

# Sachregister.


Aberration der Fixsterne 443.
— chromatische 490.
— sphärische 455, 475.
Abkühlungsverfahren 198.
Ablenkung der Magnetnadel 298.
Abplattung der Erde 69.
Absolute Festigkeit 77.
— Feuchtigkeit 185.
— Maſse 15, 381, 388.
— Temperatur 162.
Absolutes Brechungsverhältnis 463.
Absorption der Gase 144.
— des Lichts 495.
— der Wärmestrahlen 205. 504.
Absorptionskoëfficient 145.
Absorptionsspektrum 497.
Abweichung, magnetische 222.
Acceleration 10.
Accommodation 569.
Accord 410.
Accumulator 289, 305, 315.
Achromatismus 489.
Achse, freie 56.
— magnetische 218, 227.
Achsenbilder 549.
Aderhaut 568.
Adhäsion 77. 112.
Adiabatisch 200.
Adsorption 146.
Aërostatik 118.
Affinität 77.
Aggregatzustände 209.
Aktinische Strahlen 510.
Aktion, feste elektrolytische 295.
— sekundäre 292.
Akustik 403, 408.
Akustisch 408.
Alkoholometer 103.
Amalgam, Kienmayersches 255.
Amalgamiren 289.
Amorph 85, 539.
Ampère 297, 316, 320, 344, 391.
Ampèremeter 344.
Ampèresches Gestell 347.
Ampèresche Regel 299.
Amplitude 57, 397.
Amylacetatlampe 442.
Analysator 545.
Aneroidbarometer 122.
Anion 292.
Anisotrop 85. 540.
Anker 220, 372, 373, 374.
Anode 291.
Anomalie des Wassers 158.
Ansammlungsapparate 257.
Antennen 568.
Antrieb 20.
Anziehung, allgemeine 67.
— elektrische 234.
— magnetische 218.
Aperiodisch 383, 385.
Aplanatisch 491.
Apochromatisch 490.
Äquator, magnetischer 225.
Äquimolekulare Lösungen 135, 168, 175.
Äquipotentiale Flächen und Linien 319, 333.
Äquivalent, chemisches 295.
— elektrochemisches 298.
— mechanisches der Wärme 24, 208.
Aräometer 104.
Arbeit 21, 208, 210.
Arbor saturni 293.
Archimedisches Gesetz 97, 132.
Armatur 220, 266, 267.
Assimilation 510.
Astasie, astatisch 222, 347.
Astatisches Nadelpaar 222, 300, 302.
Asymmetrisches Krystallsystem 85.
Atherman 504.
Äther 513, 514, 567.
Atmosphärische Elektricität 278.
— Linien 498.
— Strahlenbrechung 461.
Atom 73.
Atomgewichte 75.
Atomwärme 199.
Auflösung 114.
Auftrieb 97, 131.
Auge 568.
Augenmaſs 439.
Ausdehnung 152, 156, 157, 160.
Ausdehnungskoëfficient 153, 156, 161.
Ausflieſsen von Flüssigkeiten 104.
Ausflieſsen von Gasen 140, 212.
Auslader 272.

Ausweichung 397.
Avogadros Gesetz 134, 200, 212, 213.

Babinets Prinzip 526.
Bahn 5.
Ballistische Kurve 20.
Ballistisches Galvanometer 357.
Balmainsche Leuchtfarbe 510.
Bandenspectrum 494.
Barlowsches Rad 345, 346.
Barometer 119.
Barometerformel 125.
Barometerprobe 128.
Batavische Tropfen 78.
Batterie, elektrische 260.
— galvanische 285, 305.
— sekundäre 305.
Bauch 401, 402.
Bechersäule 285, 286.
Becquerelstrahlen 369.
Beharrungsvermögen 16.
Benetzung 112.
Berührungs-Elektricität 280.
Beschleunigung 10, 11, 12, 63, 389.
Beugung 523.
Bewegung 5, 15.
— auf schiefer Ebene 27.
Bewegungsenergie 23, 389.
Bewegungsgesetze, 15, 51.
Bewegungsgröfse 20.
Bifilare Aufhängung 45, 272.
— Wickelung 357.
Bild durch kleine Öffnungen 438.
— reelles 452, 467.
— virtuelles 453, 468.
Bildumkehrung 479.
Binokulares Sehen 571.
Biot-Savartsches Gesetz 333.
Blättermagnet 221.
Blasen 111.
Bleibaum 293.
Bleisicherungen 321.
Blinder Fleck 568.
Blitz 275.
Blitzableiter 277.
Blitzröhre 276.
Bodendruck 95.
Bodenleitung 339, 385.
Bogenlampe, -licht 324, 342, 343.
Bologneser Fläschchen 78.
Bolometer 317, 503.
Böschungswinkel 89.
Boylesches Gesetz 123.
Brechung 455, 512.
— elektrischer Strahlen 548.
Brechungsgesetz, Snelliussches 543.
Brechungskoëfficient 456, 461, 488, 520.
Bremsdynamometer 90.
Brennebene 450.
Brennfläche 455.
Brennglas 466.
Brennlinie 455.
Brennpunkt 450, 453, 467.
Brennspiegel 450.
Brennweite 450, 467.
Brewstersches Gesetz 539.
Brille 551.
Brockengespenst 529.
Brücke, Wheatstonesche 317.
Brückenwage 48.
Brunnen 138.
Bunsensche Wasserluftpumpe 130.
Bunsenscher Brenner 434.
Bunsensches Element 288, 306, 315
— Photometer 441.
Büschelentladung 274.
Bussole 224.

Camera lucida 459, 460.
— obscura 438, 469.
Cartesianische Taucher 132.
Centesimalskala 149.
Centesimalwage 48.
Centralbewegung 48.
Centrifugalbahn 53.
Centrifugalkraft 52.
Centrifugalmaschine 53.
Centrifugalregulator 54.
Centripetalkraft 49, 50.
Charlière 133.
Chemische Wirkung des Lichts 508.
Chladnis Klangfiguren 422.
Choroidea 568.
Chromatische Aberration 490.
Chromoskop 576.
— Polarisation 546.
Chronometer 155.
Chronoskop 425.
Circularpolarisation 551.
Clark-Element 289, 307, 312, 315.
Compoundmaschine 375.
Contractio venae 106.
Cornea 568.
Corpusculartheorie 513.
Cortisches Organ 433.
Coulomb 298, 391.
Coulombsches Gesetz 228, 238, 241, 242, 243.
Crookessche Röhren 364, 365.
Cylinder 215.
Cylinderinduktor 371.
Cylinderwickelung 374.

Dädaleum 574.
Daltonsches Gesetz 143, 146, 185, 211.
Dampf 171, 194, 210.
Dampfdichte 183.

Dampfheizung 180.
Dampfmanometer 174.
Dampfmaschine 215.
Dämpfung 383.
Daniellsches Element 288, 306, 315.
— Hygrometer 186.
Dasymeter 132.
Dauer des elektrischen Funkens 274.
Dauer des Lichteindrucks 573.
Decimalwage 48.
Deflexion der Kathodenstrahlen 367.
Degradation der Energie 215.
Deklination 222.
Deklinationsbussole 224.
Deklinatorium 223.
Densimeter 103.
Deprez-Galvanometer 346.
Destillation 180.
Dewarsche Flaschen 206.
Diabetometer 562.
Dialyse 117.
Diamagnetismus 336.
Diatherman 504.
Dichroismus 545.
Dichte 99.
— der Erde 70.
— der Gase und Dämpfe 164, 183.
— elektrische 238.
Dielektrica 246.
Dielektricitätskonstante 263, 567.
Differentialflaschenzug 44.
Differentiallampe 343, 344.
Differenzton 427.
Diffraktion 523.
Diffusion der Flüssigkeiten 115.
— der Gase 143.
— des Lichts 435.
Dilatometer 156.
Dimension 12, 388.
Dimorph 85.
Dioptrie 470
Dispersion 481, 521.
Dissipation der Energie 215.
Dissociation, elektrolytische 296.
Dissonanz 427.
Donner 276.
Doppelbrechung 539.
— cirkulare 555.
— elektrische 264, 563.
Doppelfernrohre 479.
Doppelfläche, magnetische 330.
Doppelplatte 557.
Doppel-T-Anker 374.
Dopplersches Prinzip 522.
Drache, elektrischer 275.
Drehstrom 362, 379.
Drehung der Polarisationsebene 551.
— magnetische 562.
Drehwage 81, 241, 269.
Druck 6.
— der Dämpfe 172.
— der Flüssigkeiten 91.
— der Gase 118, 123, 124, 126.
— elektrostatischer 239, 240.
— kritischer 190.
— osmotischer 116, 164.
Druckpumpe 139.
Drummondsches Licht 435.
Dulong-Petitsches Gesetz 199.
Dunkelkammer 438, 469.
Durchsichtigkeit 435.
Dynamoelektrische Maschine 374.
Dynamometer 81, 90.
Dyne 14, 389.

Ebbe 70.
Echo 407.
Effekt 21, 389.
— des Stromes 320.
Effusion 212.
Ei, elektrisches 275.
Einachsige Krystalle 543.
Einheiten, der Masse und der Kraft 14, 15.
— absolute, elektrische 389.
Eisenbahn, elektrische 376.
Eiskalorimeter 196.
Elasticität 79.
Elasticitätskoëfficient 80.
Elasticitätsmodul 80, 422.
Elastische Nachwirkung 79.
— Schwingungen 82, 563.
Elektricität, positive und negative 236.
Elektrisches Feld 244.
Elektrische Fluida 235.
Elektrischer Geruch 275.
Elektrische Ladung 238.
Elektrische Kapacität 246.
Elektrisches Pendel 235.
Elektrische Schwingungen 385, 565.
Elektrischer Wind 240.
Elektrisirmaschine 255, 257.
Elektrochemisches Äquivalent 298.
Elektroden 267, 284, 291, 362.
— unpolarisirbare 305.
Elektrodynamik 346.
Elektrodynamometer 348.
Elektrolyse 291, 295.
Elektrolyt 291.
Elektrolytische Dissociation 296.
Elektrolytische Gesetze 296.
Elektrolytische Leitung 294.
Elektrolytischer Lösungsdruck 307.
Elektrolytischer Unterbrecher 361.
Elektromagnet 328.
Elektromagnetische Lichttheorie 565.
Elektromagnetische Maschinen 341, 369, 371, 372, 374, 375.

Elektrometer 269.
Elektromotor 341.
Elektromotorische Kraft 279, 281, 354, 355, 390.
Elektromotorische Gegenkraft 307, 325.
Elektronen 367, 369, 521.
Elektrophor 254.
Elektroskop 252. 259.
Elektroskopisches Pulver 275.
Elektrostatischer Druck 239.
Elektrothermometer 273.
Elemente, chemische 75.
— des Erdmagnetismus 227.
— galvanische 280, 287, 315.
Elmsfeuer 277.
Emanationstheorie 513.
Emission 493.
Emissionstheorie 513.
Endosmose 115.
Energie 23.
— der elektrischen Ladung 249.
— Prinzip der Erhaltung der, 25.
Energie der Sonnenstrahlen 510.
Energiespektrum 505.
Entfernungsmesser, stereoskopischer 573.
Entladung 257, 272, 387, 564.
— oscillatorische 387.
Entladungsströme 279.
Erdfernrohr 478.
Erdinduktor 380.
Erdmagnetismus 221.
Erg 21, 389.
Ergänzungsfarben 483.
Eutektische Mischung 169.
Exkursion 397.
Exosmose 115.
Expansion 160, 216.
Expansivkraft 118.
Extraktpresse 96.
Extrastrom 356.

Fadenkreuz 477.
Fadentelephon 403.
Fall 6, 12.
— längs schiefer Ebene 28.
Fallmaschine 8.
Fallrinne 8.
Fallröhre 13.
Farad 391.
Faradaysche elektrische Gesetze 294.
Faradisiren 358.
Farben 481, 517.
— dünner Blättchen 530.
— natürliche 494.
Farbenempfindung 575.
Farbenkreisel 573.
Farbenringe in Krystallen 550.
— Newtonsche 530.
Farbenzerstreuung 481.
Fata Morgana 462.
Federwage 80.
Feld, elektrisches 244.
— magnetisches 228.
Feldmagnete 374.
Feldstärke 229, 244, 389, 390.
Feldstecher 478.
Fenster, rundes und ovales 433.
Fernpunkt 569.
Fernrohr 477, 479.
Fernsprecher 383.
Feste Körper 72, 209.
Festigkeit 77.
Feuchtigkeit 185.
Feuerspritze 139.
Flächenblitz 276.
Flächensatz 50.
Flammenbogen 324.
Flamme, singende 418.
Flasche, Leidener 259.
Flaschenelement 287.
Flaschenzug 42.
Flemingsche Regel 345, 353.
Fliehkraft 52.
Flüssigkeit 91, 210.
Flüssigkeitshäutchen 111.
Flugrad, elektrisches 240.
Fluida, elektrische 235.
Fluorescenz 363, 499.
Flut 70.
Focusröhren 367.
Fortpflanzung des Drucks 91, 131.
Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichts 443, 520, 542.
— des Schalles 405.
— elektrischer Wellen 565.
Foucaultsches Pendel 64.
Foucaultsche Ströme 360, 382.
Franklinsche Tafel 259.
Fraunhofersche Linien 487, 488.
Fresnelsche Spiegel 513.
Friktion 88.
Fulgurit 276.
Funke, elektrischer 257, 267, 268, 274.
Funkeninduktor 360, 361.
Funkenmikrometer 257.

Galvanische Batterie 285.
Galvanisirung 359.
Galvanismus 280.
Galvanokaustik 321.
Galvanometer 299.
Galvanoplastik 298.
Galvanoskop 299.
Galvanostegie 298.
Gas 194.
Gasharmonika 418.
Gasmesser 143.

Gasometer 142.
Gastheorie, kinetische 211.
Gay-Lussacsches Gesetz 162, 211.
Gebundene Elektricität 250.
Gefäſsbarometer 121.
Gefrierapparat 183.
Gefrierverzug 167.
Gegenstrom 356.
Gegenwirkung 17.
Gehör 433.
Gehörknöchelchen 433.
Geiſslersche Röhren 362.
Gelber Fleck 569.
Geräusch 409.
Gesättigte Dämpfe 172.
Geschwindigkeit 5, 6, 11, 388.
Gesichtsfeld 481.
Gewicht 6, 14.
— der Luft 118.
— spezifisches 95, 99, 100, 133, 183.
Gewichtsaräometer 104.
Gewichtsthermometer 158.
Gewitter 276.
Geysir 178.
Giftheber 135, 136.
Gitter, Gitterspektrum 526, 527.
Glaselektricität 235.
Glaskörper 568.
Glassäule 538.
Glasthränen 78.
Gleichgewicht 26, 43.
— bewegliches 206.
Gleichgewichtsfiguren 111.
Gleichgewichtslage 82.
Glimmlicht 274, 275, 362.
Glocke 422.
Glockenspiel, elektrisches 256.
Glühlampe 322.
Goldblattelektroskop 235.
Goniometer 464, 488.
Gravitation 67.
Gravitationskonstante 68.
Gramm 14.
Gramm-Molekül 185.
Grammescher Ring 372.
Grammophon 432.
Grauglut 505.
Grovesches Element 288, 306, 315.
Grundstoffe 75.
Grundton 410, 414, 429.
Gyrotrop 290.

Haarhygrometer 187.
Haarröhrchen 112.
Hahnluftpumpe 128.
Halbflächner 84.
Halbschattenapparat 559
Halo 485.
Hammer, magnetischer 340. 352.
Handluftpumpe 127.
Härte 77.
Hartglas 78.
Harzelektricität 235.
Hauptebenen, Hauptpunkte 474.
Hauptschluſsmaschine, 375.
Hauptschnitt, bei Krystallen 540.
— beim Prisma 463.
Hebel 38.
Heber 135.
Heberbarometer 121.
Hefnerlampe 442.
Heiligenschein 529.
Heliostat 446.
Helium 192.
Hemiëder 84.
Henry 355.
Henrys Gesetz 145.
Heronsball 139.
Heronsbrunnen 139.
Heterotrop 85, 540.
Hexagonales Krystallsystem 85.
Hizdrahtinstrumente 321.
Hochdruckmaschine 216.
Hof 528.
Höhenmessung, barometrische 125.
Hohllinse 465, 470.
Hohlprisma 464.
Hohlspiegel 449.
Holosterik-Barometer 122.
Homogenes Feld 230, 246.
— Licht 482.
Horizontalintensität 226.
Horror vacui 139.
Höhrrohr 408.
Hufeisenmagnet 220.
Huygenssches Prinzip 517.
Hydraulische Presse 92.
Hydraulischer Widder 139.
Hydroelektrisirmaschine 257.
Hydrostatische Wage 98.
Hydrostatisches Paradoxon 95.
Hygrometer 186.
Hygroskop 188.
Hygroskopisch 147.
Hypsothermometer 176.
Hysteresis 330.

Impuls 20.
Induktion 233, 350, 357.
Induktionsapparat 359.
Induktionskoëfficient 356.
Inflexion 523.
Influenz, elektrische 249, 250.
— magnetische 219, 233.
Influenzmaschine 265, 266, 267, 268.
Infrarot 502.
Inklination 224.
Inklinatorium 225.

Intensität, magnetische 225, 389.
Interferenz 398, 426, 514.
— elektrischer Wellen 567.
Intervall 411.
Ion, Ionten 292, 296.
Iris 568.
Isochromatische Kurven 530.
Isochronismus 60, 82.
Isodynamen 226.
Isogonen 223.
Isoklinen 225.
Isolator, Isoliren 235.
Isolirschemel 256.
Isothermen 194.
Isotrop 85, 540, 542.

Joulesches Gesetz 320.
Joulesche Wärme 327.

Kaleidophon 424.
Kaleidoskop 448.
Kalklampe 435.
Kalklicht 435.
Kalkspat 540, 541.
Kalorie 166, 195.
Kalorimeter 196.
Kältemischungen 169.
Kammerton 413.
Kanalwage 93.
Kanile 423.
Kapacität, elektrische 246, 269, 390.
— induktive 268.
— Wärme- 195.
Kapillarität 112.
Kardinalpunkte 475.
Kaskadenbatterie 262.
Kathetometer 3.
Kathode 291, 295.
Kathodenlicht 365.
Kathodenstrahlen 362, 364—367, 369, 564.
Kation 291.
Kaustik 455.
Keil 31.
Keplersche Gesetze 66.
Kette, galvanische 286.
Kilogramm 14.
Kilogrammeter 21, 24.
Kilowatt 21.
Kimmung 462.
Kinematograph 574.
Kinetische Energie 23.
— Theorie der Aggregatzustände 209.
— — der Gase 211.
Kirchhoffsche Sätze 318.
Kirchhoffs Gesetz 498.
Klang 409, 428.
Klanganalyse 430.
Klanganalysator 430.
Klangfarbe 428.
— der Vokale 431.
Klangfiguren 422.
Kleistsche Flasche 260.
Klemmenspannung 313, 316, 375.
Klinorhombisches Krystallsystem 84.
Klinorhomboidisches Krystallsystem 85.
Knall 409.
Knallgasvoltameter 297.
Knoten 401, 405, 414, 419.
Knotenlinien 422.
Knotenpunkte 475.
Kochen 176.
Koërcitivkraft 219, 330.
Kohärer 567.
Kohäsion 77, 109.
Kohäsionsdruck 110.
Kollektor 258.
Kollimator 489, 491.
Kolloide 117.
Kombinationston 427.
Kommunizirende Röhren 93.
Kommutator 290.
Kompafs 224.
Kompensationsmethode 318.
Kompensationspendel 154.
Kompensator 558.
Komplementäre Farben 483.
Komponenten 26, 59.
Kompressibilität 108.
Kompressionsapparat 109, 189.
Kompressionspumpe 131.
Kondensator bei Dampfmaschinen 216.
— elektrischer 257.
Konduktor 255, 256, 258.
Konisches Pendel 61, 62.
Konjugirte Punkte u. Ebenen 450, 451, 469.
Konkavlinsen 465, 470.
Konkavspiegel 449.
Konsonanz 410, 431.
Konstante Elemente 286, 308.
Kontaktelektricität 280.
Konvektion 204.
Konvexlinsen 465.
Konvexspiegel 449.
Korkkugeltanz 256.
Korpuskeln 367.
Körperfarben 496.
Kraft 6, 13, 14.
— elektromotorische 390.
— lebendige 22.
Kräftepaar 34.
Kraftlinien, elektrische 244.
— magnetische 228.
Kraftübertragung 375.
Kreisel 55.
Kreisstrom 329.

Kreuzungspunct 569.
Kritischer Druck 190.
Kritische Temperatur 190.
Kryohydrat 169.
Kryophor 182.
Krystall 83, 539.
Krystallachse 540.
Krystallisationswärme 170.
Krystalllinse 568.
Krystalloide 117.
Krystallsystem 83.
Kugelblitz 276.
Kundtsche Röhre 419.
Kupfervoltameter 297.

Labyrinth 433.
Ladung, elektrische 238.
Lamellenmagnet 221.
Läutewerk, elektrisches 340, 341.
Latente Wärme 166, 180.
Lebensrad 574.
Leidener Flasche 259.
Leidenfrostscher Versuch 178.
Leitung 21, 389.
Leiter der Elektricität 234, 283, 294.
— der Wärme 201.
Leitstrahl 50.
Leitungsfähigkeit für Elektricität 265, 348.
— für Wärme 201, 202.
Lenzsches Gesetz 353.
Leuchtfarbe 502, 510.
Leuchtsteine 501.
Libelle 94.
Licht 434.
— natürliches 535.
Lichtbogen 324.
Lichtbogen, sprechender 385.
Lichttonleiter 517.
Lichtelektrische Entladung 564.
Lichtelektrische Erregung 564.
Lichtenbergsche Figuren 274.
Lichtmühle 508.
Liebigscher Kühler 181.
Linienspektrum 494.
Linke-Hand Regel 345, 348, 353.
Linsen 465.
— achromatische 491.
Linsenstereoskop 572.
Linsensysteme 473.
Lippenpfeife 416.
Lissajoussche Figuren 424.
Lokomotive 216.
Longitudinalschwingungen 396, 414, 419.
Lösung 114.
Lösungsdruck, elektrolytischer 307.
Lösungstension 307.
Lösungswärme 169.
Lot 7.
Luftballon 133.
Luftdruck 118.
Luftelektricität 275.
Luftpumpe 126, 128, 129, 130.
Luftsaugepumpe 130.
Luftspiegelung 461.
Luftthermometer 161.
— Kinnersleys 273.
Luminescenz 502.
Lupe 470, 476.

Magazin, magnetisches 221.
Magdeburger Halbkugeln 121.
Magnesiumlampe 435.
Magnet 218, 221.
Magnetelektrische Maschine 369, 371.
Magnetfeld 228, 331.
Magnetinduktion 350, 352, 370.
Magnetischer Hammer 340.
Magnetisches Moment 231, 335.
Magnetisirung 221.
Magnetismus 218, 349.
— tellurischer 222.
Magnetnadel, Ablenkung 298.
Magnetometer 227.
Manometer 126, 132, 162.
Manometrische Flamme 416.
Mariotte-Gay-Lussacsches Gesetz 162, 194.
Mariottesche Flasche 137.
Mariottesches Gesetz 123, 124, 160 172.
Maschine 42.
Masse 12, 14.
Mafse, absolute 15, 388.
— technische, praktische 14, 15.
Mafseinheiten 2, 3, 4, 388.
Mafsflasche 261, 262.
Materie 1.
Maximum- und Minimum-Thermometer 151, 154, 155.
Mechanik 5.
— Prinzipien der 15.
Mechanische Wärmetheorie 208, 214.
Meniskus 113, 465.
Meridian, magnetischer 222, 231.
Metacentrum 102.
Metallbarometer 122.
Metallmanometer 126.
Metallthermometer 154, 155.
Meter 2.
Meterkilogramm 21.
Metronom 66.
Mikrometerschraube 30.
Mikron 3.
Mikrophon 384.
Mikroskop 478.
Milligramm 14.

Mischungsverfahren 197.
Mittelkraft 26.
Mohrsche Wage 99, 100.
Molekül 73.
Molekulargewicht 75, 185.
Molekularkräfte 76.
Molekularmagnet 218, 329.
Molekularwärme 200.
Moment 35, 38.
— magnetisches 231, 335.
Mondfinsternis 437.
Monochord 420.
Monoklines, monosymmetrisches Krystallsystem 84.
Montgolfière 133.
Mörser, elektrischer 273.
Motorunterbrecher 361.
Multiplikationsverfahren 381.
Multiplikator 299.

Nachwirkung, elastische 79.
Nachhall 407.
Nadeltelegraphen 337.
Nahepunkt 569.
Natriumflamme 494.
Natürliche Farben 496.
Nebenschlufs 316, 375.
Nebenschlufsmaschine 375.
Nebenschlufsregulator 375.
Nebensonne 486.
Nernstlampe 322.
Netzhaut 568.
Neutraler Zustand 237.
Newtonsche Ringe 530.
Nichtleiter der Electricität 234.
Nicolsches Prisma 544.
Niederdruckmaschine 216.
Niveauflächen 94, 228, 244, 319, 332.
Nonius 3.
Nordlicht 227.
Nordpol, magnetischer der Erde 222.
Normalelemente 289, 306, 312, 315.
Normallösung 135.
Normalspektrum 528.
Normalthermometer 162.
Nullpunkt 150.
— absoluter 163.

Oberflächenspannung 111.
Oberschlächtiges Rad 107.
Obertöne 414, 415, 429.
Objektiv 476, 477.
Offnungsfunke 362.
Öffnungsstrom 351, 356.
Ohm 309, 388, 391.
Ohmsches Gesetz 311.
Ohr 433.
Okklusion 146.
Oktaëder 84.
Oktave 410.
Okular 476, 477.
Operngucker 479.
Optik 434.
Optische Achse 544.
Optischer Mittelpunkt 466.
Orthochromatisch 510.
Oscillation 82.
Oscillator, elektrischer 565.
Oscillatorische Entladung 387.
Osmose 115.
Osmotischer Druck 116, 134, 164, 296, 307.
Ozon 275.

Pachytrop 314.
Papinscher Topf 177.
Papierbüschel 256.
Paradoxon, hydrostatisches 95.
Parallaxe 162, 429.
Parallele Kräfte 32.
Parallelogramm der Bewegungen und der Kräfte 25.
Paramagnetismus 336.
Partialtöne 429.
Paukenhöhle 433.
Peltiersche Wärme 327.
Peltiers Kreuz 327.
Pendel 58—65.
— elektrisches 235.
Perkussionsmaschine 87.
Permeabilität 230, 337.
Perspektiv 479.
Pfeife 414, 423.
Pferdekraft 21.
Phänakistoskop 573.
Phantoskop 573.
Phase 398.
Phiolenbarometer 121.
Phonautograph 425, 426.
Phonograph 433.
Phosphorescenz 365, 501.
Phosphorographie 510.
Photographie 508.
— der Farben 532.
Photometer 439, 459.
Piezoelektricität 278.
Piezometer 109.
Pipette 137.
Planetenbewegung 66.
Platten, schwingende 422.
Plückersche Röhren 362.
Pneumatisches Feuerzeug 200.
Pneumatische Wanne 141.
Polarisation des Lichts 533.
— chromatische 546.
— circulare 546.
— dielektrische 263, 264.
Polarisation durch Spiegelung 537, 538.

Polarisationsapparate 545, 546.
Polarisationsebene 537, 563.
Polarisationsstrom 304.
Polarisationswinkel 537.
Polarisator 545.
Polarisirter Lichtstrahl 534.
Polariskop 545.
Polaristrobometer 561.
Pole, magnetische 218.
— — der Erde 224.
— der Voltaschen Säule 281, 284.
Polonium 369.
Polstärke 228.
Polreagenspapier 293.
Poren, Porosität 72.
Potential 244, 247, 390.
— auf sich selbst 249.
Potentialgefälle 246.
Potentielle Energie 23.
Potenzflaschenzug 42.
Präcession 57.
Presse, hydraulische 92.
Primärelemente 288.
Prisma 463, 481, 548.
— achromatisches 490.
— geradsichtiges 491.
— Nicolsches 544.
Probekugel und -scheibchen 239.
Pronyscher Zaum 90.
Prototype 2, 8.
Protuberanzen 499.
Prozentaräometer 103.
Psychrometer 186, 188.
Pulver, elektroskopisches 275.
Pumpe 138.
Pupille 568.
Pyknometer 100.
Pyrheliometer 512.
Pyroelektricität 278.
Pyrophor 147.

Quadrantenelektrometer 270.
Quadrantenelektroskop 261.
Quadratisches Krystallsystem 84.
Quadratische Doppelpyramide 84.
Quecksilberluftpumpe 129.
Quecksilberregen 121.
Quecksilberunterbrecher 362.

Rad an der Welle 41.
Radiometer 508.
Radium 369.
Radius vector 49.
Radivaktive Substanzen 369.
Randwinkel 112.
Rautenflächner 540.
Reaktion 106.
Realsche Presse 96.
Rechte-Hand-Regel 353.
Recipient 127.
Reciprocität 457.
Reduktion der Gasvolumina 164.
Reduktion des Barometerstandes 123.
Reduktionsfaktor 303, 336.
Reduzirte Pendellänge 65.
Reduzirtes Auge 569.
Reelle Bilder 452, 467.
Reflektor 479.
Reflexion 401, 404, 407, 445, 518.
— diffuse 435.
— totale 455.
Reflexionsgoniometer 447.
Reflexionsprisma 458.
Refraktion 455.
Refraktor 479.
Regelation 168.
Regenbogen 484, 485.
Reguläres Achsenkreuz 84.
Reguläres Krystallsystem 83.
Reibung 88.
Reibungskoefficient 89.
Reibungsreihe 237.
Reibungswinkel 89.
Relative Festigkeit 77.
— Feuchtigkeit 186.
Relais 340.
Relieffernrohre 572.
Residuum 265.
Resonanz 427.
Resonator 428, 430, 565.
Resultante 26.
Retina 568.
Reversionspendel 65.
Rheostat 310.
Rhombisches Krystallsystem 84.
Rhomboëder 84.
Richmannsche Regel 198.
Richtungslinie 569.
Riesenteleskop 480.
Ringanker 373.
Rolle 41.
Rollenzug 42.
Röntgenstrahlen 367, 368.
Rostpendel 154.
Rotationsapparat 57.
Rotationsmagnetismus 382.
Rotationspolarisation 551.
Rotglut 502.
Rückstand 264.
Ruhewinkel 89.

Saccharimeter 558.
Saiten 420.
Sammellinse 471.
Sammelspiegel 452.
Sättigung 219, 329.
Sättigungsdruck 173.
Sättigungsverhältnis 186.

Saugpumpe 138.
Saugwirkung der Spitzen 251.
Säule, Voltasche 284.
Säule, Zambonische 284.
Säulenelektroskop 285.
Saussures Haarhygrometer 187.
Savartsches Rad 409.
Schall 403, 409.
Schatten 436.
Scheinbare Ausdehnung 158.
— Gröfse 439, 569.
Schiefe Ebene 27.
Schirmwirkung, elektrische 251.
Schlag, elektrischer 272.
Schlagweite 257.
Schleuder 52.
Schliefsungsstrom 351, 356.
Schlittenapparat 359.
Schlüssel 339.
Schmelzpunkt 165.
Schmelzpunktserniedrigung 168.
Schmelzverfahren 196.
Schmelzwärme 166.
Schnecke 433.
Schnellot 165.
Schnellwage 47.
Schottische Turbinen 106.
Schraube 29.
Schwarz 206, 496.
Schwebungen 426.
Schwerkraft 6, 93.
Schwerpunkt 36.
— Erhaltung desselben 88.
Schwimmen 101.
Schwingungen 59, 82, 396.
— elektrische 385, 546.
Schwingungsdauer 60, 62, 82, 387.
Schwingungsebene des Lichts 534, 535.
Schwingungsfigur 424.
Schwingungsform 420, 428.
Schwingungsknoten 401, 414, 421.
Schwingungspunkt 65.
Schwingungsweite 59, 82, 397.
Schwingungszahl der Töne 409, 413.
— des Lichts 516.
— eines Pendels 63.
Schwungkraft 52.
Schwungmaschine 53.
Sclerotica 568.
Sehpurpur 569.
Sehweite 570.
Sehwinkel 439, 569.
Seifenblasen 111.
Seilwellen 397.
Seitendruck 96.
Sekundäre Aktion 292.
Sekundärelement 289.
Sekunde 4.
Sekundenpendel 63.
Selbstinduktion 356.
Selbstpotential 249.
Selbstunterbrecher 340.
Selenzelle 385.
Serienmaschine 374.
Senkel 7.
Senkwage 103.
Shunt 316.
Sicherheitslampe 204.
Sicherungen 321.
Sieden 176.
Siedepunkt 150, 176, 178.
— absoluter 194.
Siedeverzug 178.
Siemenssche Einheit 309.
Sinusoide 398.
Siphonflasche 139.
Sirene 409.
Skalenaräometer 103.
Skioptikon 469.
Solenoid 330.
Sonnenfinsternis 437.
Sonnenmikroskop 469.
Sonnenspektrum 488.
Sonnenstrahlung 510.
Spaltbarkeit 83.
Spannkraft der Dämpfe 173.
— der Gase 118.
Spannung 23, 244.
Spannungskoëfficient 161.
Spannungsmesser 317, 344.
Spannungsreihe, thermoelektrische 325.
— Voltasche 282.
Spektralanalyse 494.
Spektralapparat 491.
Spektralröhre 495.
Spektrometer 488, 489.
Spektroskop 491.
Spektrum 482, 483, 486, 487, 497, 504, 505, 506, 528.
— normales 528.
Spezifisches Gewicht 95, 99, 100 133, 183.
Spezifische Wärme 195, 200.
Sphärische Aberration 455, 475.
Sphärische Spiegel 449.
Sphärometer 30.
Spiegel 418, 449, 454.
Spiegelablesung 47, 227, 271, 302, 447.
Spiegelgalvanometer 301.
Spiegelfernrohr 479, 480, 481.
Spiegelsextant 448.
Spiegelskala 162, 447.
Spiegelstereoskop 572.
Spitzenwirkung 240, 251.
Sprachgewölbe 408.
Sprachrohr 405, 408.
Spratzen 146.

Sprengelsche Pumpe 131.
Springbrunnen 105.
Springfluten 71.
Spritzflasche 139.
Stabilität, Standfestigkeit 44.
Stabmagnetismus 389.
Staubfiguren, elektrische 275.
Stechheber 137.
Stellschraube 30.
Stereoskop 571.
Stethoskop 408.
Steuerung der Dampfmaschine 215.
Stiftschreiber 337.
Stimmgabel 425.
Stimmung 425.
Stoff 1.
Stöpselrheostat 311.
Störungen, magnetische 227.
Stofs 85.
Stöfse 427.
Stofsheber 139.
Stofskraft 20.
Strahl, ordinärer u. extraordinärer 543.
Strahlung 502, 510, 512, 517.
Strahlungsmesser 508.
Stroboskop 573.
Strom, elektrischer oder galvanischer 286.
Stromelemente 334.
Stromlinien 319.
Strommesser 344.
Stromstärke 286, 297, 312, 335, 390.
Stromverzweigung 316.
Stromwärme 320.
Stromwender 290, 342.
Sublimation 181.
Südpol 218.
Superposition 399.
Susceptibilität 233.

Tafelwage 48.
Tangentenbussole 302, 303, 312.
Tangentialbewegung 49.
Tarirfläschchen 100.
Tartinische Töne 427.
Taster 338.
Tauchbatterie 287.
Taucher, Cartesianische 132.
Taucherglocke 132.
Taupunkt 186.
Taylorsche Formel 421.
Technischer Regulirwiderstand 310.
Teilbarkeit 73.
Teilmaschine 30.
Teiltöne 429.
Telegraphie 337.
— ohne Draht 549.
Telephon 383.
Teleskop 479.
Telestereoskop 572.
Tellurischer Magnetismus 222.
Temperatur 148, 158.
— absolute 162.
— kritische 190.
— musikalische 412.
Temperaturgefälle 202.
Temperaturkoëfficient 309.
Tension 118.
Tesla-Transformator 388.
Tesla-Licht 388.
Tesserales Krystallsystem 83.
Tetragonales Krystallsystem 84.
Thaumatrop 573.
Theaterfernrohr 479.
Theodolith 478.
Thermochrose 504.
Thermodynamik 207.
Thermoelektricität 325.
Thermoelement 326.
Thermometer 149, 150, 152.
Thermometrograph 150, 151.
Thermomultiplikator 326, 503.
Thermosäule 326.
Thermoskop 148.
Thermostrom 325.
Ton, Tonhöhe 409, 428.
Tonleiter 410.
Tonmesser 427.
Torricellische Leere 120.
Torricellischer Lehrsatz 105.
Torsion 77, 81.
Torsionswage 241.
Totalreflektometer 458.
Totalreflexion 455.
Trägheit 16.
Trägheitsmoment 58.
Tragkraft der Magnete 220.
Transformator 378.
Transmitter 384.
Transversalschwingungen 396, 420, 516.
Tribometer 88.
Triklines Krystallsystem 85.
Trockenelemente 289.
Trockene Säule 284.
Trommelanker 373.
Trommelfell 433.
Turbine 106, 107.
Turmalin 278, 533—536, 543.
Turmalinzange 545.

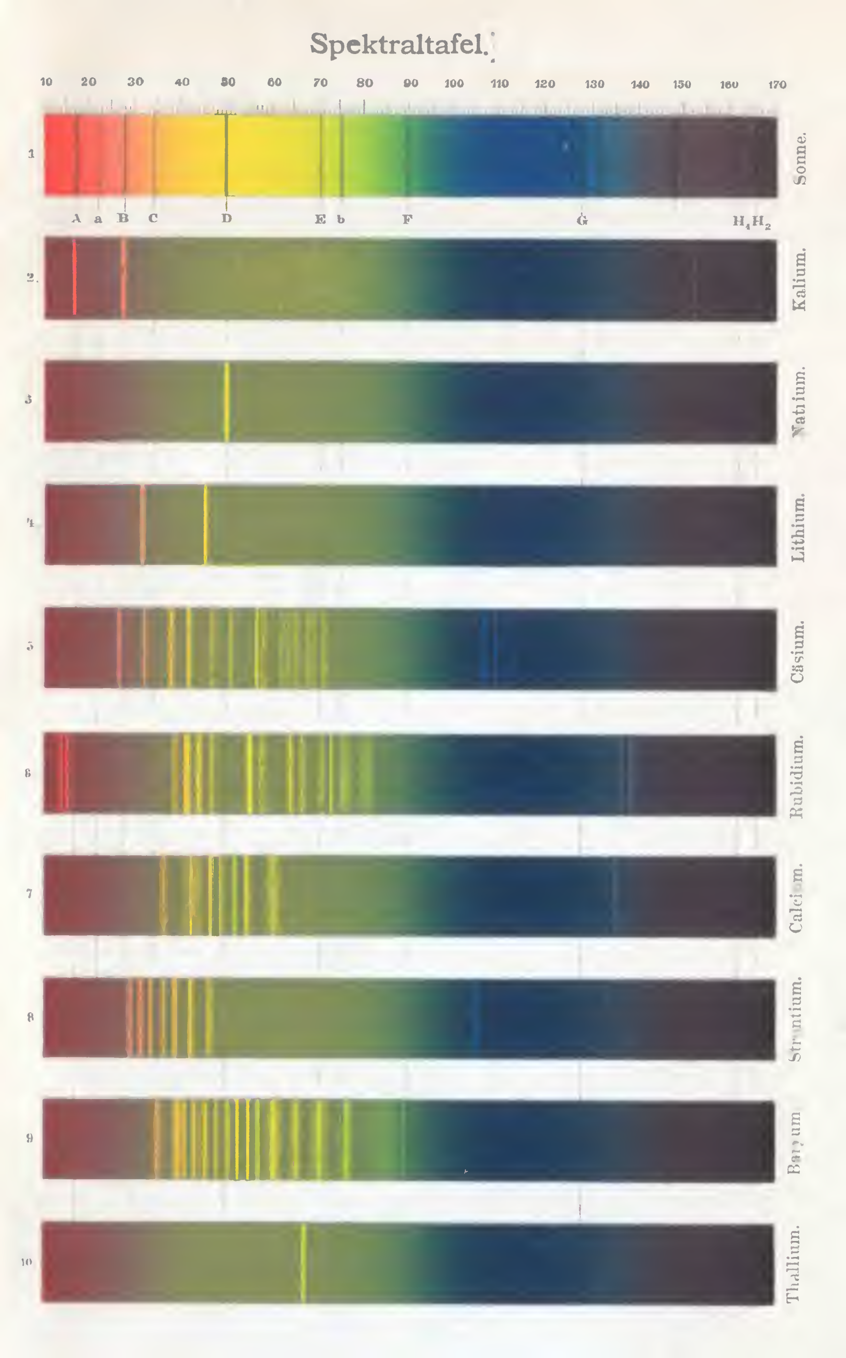
Überführung 297.
Übergangsfarbe 557.
Überhitzter Dampf 177.
Übersättigung 115.
Überschmelzung 167.
Übertrager 340.
Uhr 60, 81, 155.

Uhr, elektrische 341.
Ultrarot 501.
Ultraviolett 499.
Umformen 378.
Umkehrung des Spektrums 497.
Unabhängigkeitsprinzip 16.
Undulationstheorie 514.
Undurchdringlichkeit 72.
Unipolarinduktion 353.
Unpolarisirbare Elektroden 305.
Unterbrechungsfunken 361.
Unterkühlung 167.
Unterschlächtiges Rad 107.

Variationen, magnetische 228.
Verbindungsspektrum 494.
Verbindungswärme 170.
Verbrennung 170, 511.
Verbundmaschine 375.
Verdampfung 171, 179.
Verdampfungswärme 179.
Verdunstung 171.
Verdunstungskälte 181.
Verflüssigung der Gase 188.
Vergröfserung 481.
Vernier 3.
Verteilung, elektrische 249.
Vibration 82.
Vibrationschronoskop 425.
Vibrationstheorie 514.
Vibrographie 425.
Virtuelle Arbeit, Geschwindigkeit, Momente 43.
— Bilder 453, 470.
Virtueller Brennpunkt 453, 470.
Visirrohr 478.
Vokale 431.
Volt 312, 355, 391.
Voltainduktion 350, 351.
Voltameter 297.
Voltampère 320.
Voltascher Becher 280.
— Fundamentalversuch 282.
Voltasche Säule 284.
— Spannungsreihe 282.
Voltasches Spannungsgesetz 282.
Voltmeter 317.
Volumeter 103.
Vorhof 433.

Wage 46.
— hydrostatische 98.
Wageelektrometer 271.
Wärme 148.
— gebundene, latente 166, 180.
— spezifische 195.
— tierische 170.
Wärmeäquivalent 24, 208.
Wärmeeinheit 166, 195.
Wärmekapacität 195.
Wärmeleitung 201.
Wärmestrahlung 204, 502.
Wärmetheorie, mechanische 206, 207.
Waschflasche 136.
Wasserbatterie 286.
Wasserheizung 204.
Wasserinfluenzmaschine 269.
Wasserkalorimeter 198.
Wasserluftpumpe 129.
Wassermotor 107.
Wasserrad 107.
Wasserstoffthermometer 162.
Wasserwage 93.
Wasserwellen 394.
Wasserzersetzung 291.
Watt 21, 320.
Wattmeter 349.
Wechselströme 352, 371, 378, 383.
Wechselstrommaschinen 377.
Wellen 393, 404.
— elektrische 565.
— stehende 399, 400, 402, 531.
Wellenfläche 540.
Wellenlänge 395, 413, 516, 565.
Wellenmaschine 393.
Wellenrinne 395.
Weston-Element 290, 312, 315.
Wetterhäuschen 188.
Wheatstonesche Brücke 317.
Widder, hydraulischer 139.
Widerstand 265, 308, 309, 357, 390.
Windbüchse 131.
Windkessel 139.
Winkelgeschwindigkeit 57.
Winkelspiegel 447.
Wirbelstrom 382.
Wirkungssphäre 110.
Wucht 21, 389.
Wunderscheibe, Wundertrommel 574.
Wurf 17, 19.

Zambonische Säule 284.
Zauberlaterne 469.
Zaum, Pronys 90.
Zeichendrucktelegraph 338.
Zeigerwage 48.
Zerstreuungskreis 569.
Zerstreuungslinse 471.
Zerstreuungsspiegel 453.
Zootrop 574.
Zug 7.
Zündmaschine 147.
Zungenpfeife 423.
Zurückwerfung 85, 401, 404, 407, 435, 518.
Zusammendrückbarkeit 108.
Zusammensetzung der Bewegungen und Kräfte 25, 31.
Zweiachsige Krystalle 544.


Spektraltafel.
10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 160 170
A a B C D E b F G $H_1H_2$
1 Sonne.
2. Kalium.
3 Natrium.
4 Lithium.
5 Cäsium.
6 Rubidium.
7 Calcium.
8 Strontium.
9 Baryum
10 Thallium.